

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de risco
costeiro face aos cenários de alterações climáticas: Aplicação
ao Estuário do Tejo e à Ria de Aveiro**

Mariana de Sousa Costa

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica - Tecnologias e Aplicações

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Carlos Manuel Correia Antunes
Professora Doutora Cristina Maria Sousa Catita

2017

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de risco
costeiro face aos cenários de alterações climáticas: Aplicação
ao Estuário do Tejo e à Ria de Aveiro**

Mariana de Sousa Costa

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica - Tecnologias e Aplicações

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Carlos Manuel Correia Antunes
Professora Doutora Cristina Maria Sousa Catita

2017

*Esta dissertação encontra-se escrita segundo o antigo acordo
ortográfico*

Resumo

Actualmente, não parecem existir dúvidas sobre o aumento do nível médio do mar, provocado pelo aquecimento global do nosso planeta tendo como consequências o degelo de importantes glaciares e o aumento da temperatura dos oceanos. A questão será determinar a escala deste aumento e os impactos dele decorrentes.

Segundo as projecções avançadas nesta dissertação, o impacto em Portugal será grande, pois, à semelhança do que acontece no resto da Europa, a maioria da população e as actividades económicas encontram-se em zonas costeiras. Esta dissertação procura dar um contributo científico para a avaliação do risco em zonas costeiras face aos cenários de sobrelevação de maré resultantes das alterações climáticas em curso. A metodologia desenvolvida é aplicada às regiões do Estuário do Tejo e Ria de Aveiro, com elevada ocupação urbana, actividades económicas e um elevado valor ecológico, devido às suas características únicas de sistemas estuarinos. O estudo é desenvolvido em várias fases, sendo que numa primeira fase são gerados os cenários de inundação para dois horizontes temporais (2050 e 2100) para as áreas em estudo, baseados nas incertezas dos parâmetros utilizados. A vulnerabilidade costeira é então determinada a partir da adaptação do índice de vulnerabilidade costeira (CVI - *Coastal Vulnerability Index*) que caracteriza a vulnerabilidade de acordo com as características físicas do local. Uma vez espacializado este índice, através da integração de toda a informação num Sistema de Informação Geográfica (SIG), é produzida a cartografia de vulnerabilidade que serve para o cálculo do risco de cada zona, o qual resulta da combinação do potencial dano e da exposição de uma região. Os produtos finais deste estudo são um conjunto de elementos cartográficos: mapas de inundação, vulnerabilidade física e risco, produzidos para cada cenário de inundação proposto. Estes produtos identificam os principais pontos críticos das regiões, fornecendo assim informação sobre o número total de habitantes potencialmente afectados e as principais estruturas em perigo.

De acordo com as projecções avançadas, o Estuário do Tejo tem para o cenário de 2050 com o *setup* do vento e ondas um total de área inundável de 425.5 km², sendo que 62.3 % da sua área está classificada com uma probabilidade muito elevada de ser inundada (classe 5). Para o cenário mais gravoso existe uma probabilidade muito elevada de serem inundados cerca de 472.8 km². A Ria de Aveiro apresenta um total estimado de 145.5 km² de área com elevada probabilidade de inundação em situação extrema, que corresponde a 71.2 % da área com susceptibilidade de inundação. Para 2100 esta área aumenta e passa a existir cerca de 75% de zonas classificadas como muito provável de inundar.

Palavras-chave: Risco de inundação; Vulnerabilidade física; Vulnerabilidade socio-económica; Subida do nível médio do mar; Sistemas de Informação Geográfica; Estuários

Abstract

Currently, there is no doubt about the rise in average sea level caused by global warming of our planet resulting in the melting of important glaciers and the rising temperature of the oceans. The question will be to determine the scale of this increase and the resulting impacts.

According to the projections advanced in this thesis, the impact in Portugal will be large, as in the rest of Europe, most of the population and economic activities are in coastal areas. This dissertation seeks to make a scientific contribution to the assessment of risk in coastal areas in the face of the tide scenarios resulting from ongoing climate change.

The methodology developed is applied to the regions of the Tagus Estuary and Ria de Aveiro, which have many inhabitants and economic activities, and a high ecological value due to their unique characteristics. The study is developed in several phases. In the first phase the flood scenarios are generated for two-time horizons (2050 and 2100) for the study areas, based on the uncertainties of the parameters used. Coastal vulnerability is then determined by adapting the Coastal Vulnerability Index (CVI) index that characterizes the vulnerability according to the physical characteristics of the site. Once this index is spatialized, the integration of all the information in a Geographic Information System (GIS) produces a vulnerability mapping that is used to calculate the risk of each zone, which results from the combination of potential damage and exposure of a region. The final products of this study are a set of cartographic elements: flood maps, physical vulnerability and risk, produced for each proposed flood scenario. These products identify the main critical points of the regions, thus providing information on the total number of inhabitants affected and the main structures in danger.

According to the advanced projections, the Tagus Estuary has for the scenario of 2050 with the setup of wind and waves a total flood area of 425.5 km², with 62.3% of its area being classified with a very high probability of being flooded (class 5). For the most serious scenario there is a very high probability of being flooded about 472.8 km². The Ria de Aveiro presents an estimated total of 145.5 km² of area with high probability of extreme flooding, which corresponds to 71.2% of the area with flood susceptibility. By 2100 this area increases and exists about 75% of zones classified as very likely to flood.

Keywords: Flood risk; Physical vulnerability; Socioeconomic vulnerability; Rise of the sea level; Geographic Information Systems; Estuaries

Índice

Resumo.....	i
Abstract	ii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objectivos	3
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Variação do NMM	4
2.1.1 Maré	5
2.2 Estuários Fluviais	9
2.3 Vulnerabilidade e Risco	10
2.4 Ponderação e agregação de critérios	14
2.5 Enquadramento Legal	16
3 Metodologia proposta para os casos de estudo da Ria de Aveiro e Estuário do Tejo	18
3.1 Caracterização das áreas de estudo	19
3.1.1 Ria de Aveiro	19
3.1.2 Estuário do Tejo	22
3.2 Processo metodológico.....	25
3.2.1 Fase 1 – Aquisição de Dados	25
3.2.2 Fase 2 – Processamento e Transformação.....	27
3.3 Cartografia de Inundação	43
3.3.1 Resultados	46
3.4 Cartografia de Vulnerabilidade	51
3.4.1 Cálculo do CVI.....	52
3.4.2 Resultados	59
3.5 Cartografia de Risco.....	65
3.5.1 Cálculo da Exposição	66
3.5.2 Resultados	70
4 Conclusões	76
4.1 Conclusões	76
4.2 Recomendações futuras.....	79
5 Bibliografia	80

Lista de Figuras

Figura 2.1 Variação secular do nível médio do mar em Cascais de 1882 a 2016 (Fonte: PSMSL e IGP/DGT; Antunes, 2016)	5
Figura 2.2 Caracterização de uma maré semi-diurna típica (Extraído de Coelho, 2005).....	6
Figura 2.3 Principais conceitos referentes a níveis de maré e planos de referência (Extraído de IH, 2017)	7
Figura 2.4 Classificação dos sub-índices que compõem o índice de vulnerabilidade costeira (Adaptado de McLaughlin e Cooper, 2011).....	12
Figura 3.1 Enquadramento geográfico da Ria de Aveiro (Sistema de coordenadas: PT-TM06/ETRS89).....	20
Figura 3.2 Enquadramento geográfico do Estuário do Tejo (Sistema de coordenadas: PTM06-ETRS89).....	23
Figura 3.3 Workflow metodológico	25
Figura 3.4 Esquema do processamento seguido para a produção dos MDT	28
Figura 3.5 Exemplo de um erro no MDT do Estuário do Tejo e perfil do MDT na proximidade do erro	28
Figura 3.6 Exemplo de um erro no MDT da Ria de Aveiro e perfil do MDT na proximidade do erro	29
Figura 3.7 Distribuição dos pontos usados para a validação do MDT de (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro, pertencentes à Rede de Nivelamento Geométrico e à Rede Gravimétrica de Portugal Continental.....	30
Figura 3.8 Distribuição dos pontos extra usados para a validação do MDT de (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro, pertencentes aos pontos obtidos por GPS-RTK e às redes de apoio topográfico das Câmaras Municipais, respectivamente.....	31
Figura 3.9 Modelos Digitais de Terrenos produzidos para o (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro (Unidades de cota em metros (m))	32
Figura 3.10 Excerto da Tabela de Maré o Instituto Hidrográfico de 2017 com as concordâncias observadas em relação ao Porto de Lisboa.....	34
Figura 3.11 Localização dos portos secundários utilizados para (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro.....	34
Figura 3.12 (a) Carta geológica simplificada, adaptada da cartografia geológica à escala 1:50000 da Ria de Aveiro e (b) Reclassificação em classes do critério Geologia quanto à sua vulnerabilidade à sNMM.....	36
Figura 3.13 (a) Carta geológica simplificada, adaptada da cartografia geológica à escala 1:50000 do Estuário do Tejo e (b) Reclassificação em classes do critério Geologia quanto à sua vulnerabilidade à sNMM.....	36
Figura 3.14 Cartografia simplificada da ocupação do solo no (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro, adaptada da COS 2010	37
Figura 3.15 Linhas MPMAVE para (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro	39
Figura 3.16 Reclassificação do caudal fluvial em 5 classes de vulnerabilidade à sNMM	40
Figura 3.17 Cálculo da percentagem de área urbanizada/ industrializada em cada BGRI.....	41
Figura 3.18 Cálculo da percentagem de área com valor ecológico em cada BGRI	42
Figura 3.19 Método de determinação da probabilidade de inundação de um dado local (1.5 m, 2.5 m e 3.5 m de cota) e respetivo índice de perigosidade, relativamente ao máximo de maré sobrelevada (nível de inundação de h= 2.5 m) e baseado na incerteza dos respetivos parâmetros (Extraído de Antunes et al. (2017))	44
Figura 3.20 Esquema do processamento utilizado para a produção da cartografia de inundação, em ambiente ArcMap para o caso da classe 1 de vulnerabilidade	45
Figura 3.21 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para o Estuário do Tejo. (Alturas de inundação referentes ao Porto de Lisboa)	46

Figura 3.22 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para o Estuário do Tejo. (Alturas de inundação referentes ao Porto de Lisboa)	47
Figura 3.23 Pormenor da área com probabilidade de inundar no concelho de Lisboa. (Alturas de inundação referentes ao Porto de Lisboa)	48
Figura 3.24 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para a Ria de Aveiro. (Alturas de inundação referentes à Barra de Aveiro).....	49
Figura 3.25 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para a Ria de Aveiro. (Alturas de inundação referentes à Barra de Aveiro).....	50
Figura 3.26 Ordenação dos critérios consoante as preferências dos especialistas (ranking order)	57
Figura 3.27 Ordenação dos critérios consoante a preferência dos especialistas (Point Allocation)	57
Figura 3.28 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para o Estuário do Tejo	60
Figura 3.29 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para o Estuário do Tejo	61
Figura 3.30 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para a Ria de Aveiro.....	62
Figura 3.31 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para a Ria de Aveiro.....	64
Figura 3.32 Distribuição das diferentes ocupações do solo ao longo do Estuário do Tejo.	67
Figura 3.33 Distribuição das diferentes ocupações do solo ao longo da Ria de Aveiro	67
Figura 3.34 Localização das áreas de valor ecológico na região da (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro.....	69
Figura 3.35 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para o Estuário do Tejo.....	70
Figura 3.36 Evidencia de uma zona de risco extremamente elevado, no Concelho do Seixal, em que são potencialmente afectados 400 habitantes para o cenário de 2050.....	71
Figura 3.37 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para o Estuário do Tejo.....	72
Figura 3.38 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para a Ria de Aveiro	73
Figura 3.39 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para a Ria de Aveiro	74

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Descrição dos dados utilizados com a indicação da fonte de recolha e formato em que foram recolhidos.....	26
Tabela 3.2 Estatística da validação feita aos MDT produzidos para as duas regiões.....	32
Tabela 3.3 Classificação do critério Geologia quanto à sua vulnerabilidade física	35
Tabela 3.4 Classificação do critério Ocupação do Solo quanto à sua vulnerabilidade física.....	37
Tabela 3.5 Classificação do critério Caudal Fluvial para o Estuário do Tejo	39
Tabela 3.6 Classificação do critério Densidade Populacional.....	40
Tabela 3.7 Classificação do critério Percentagem de Área Urbanizada.....	41
Tabela 3.8 Classificação do critério Percentagem de Área com Valor Ecológico	42
Tabela 3.9 Incertezas associadas a cada parâmetro para as duas projecções em estudo (2050 e 2100) e os dois locais de estudo (cm)	43
Tabela 3.10 Cotas mínima e máxima para cada classe de probabilidade de inundação, para o cenário B3a para o ano de 2050	44
Tabela 3.11 Área inundada, em km ² , pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2050 para o Estuário do Tejo	47
Tabela 3.12 Área inundada, em km ² , pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2050 para a Ria de Aveiro	49
Tabela 3.13 Área inundada, em km ² , pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2100 para a Ria de Aveiro	50
Tabela 3.14 Índice CVI após reclassificação dos resultados obtidos	51
Tabela 3.15 Classes de vulnerabilidade física após reclassificação dos resultados obtidos.....	51
Tabela 3.16 Escala fundamental de Saaty. (Extraída de Saaty, 1987)	54
Tabela 3.17 Matriz de comparação par a par para o Estuário do Tejo, baseada na escala proposta por Saaty. (Matriz A)	55
Tabela 3.18 Matriz A normalizada.....	55
Tabela 3.19 Valores do Random Index (RI), extraídos de Saaty (1987)	56
Tabela 3.20 Importâncias relativas obtidas para cada critério em percentagem (%), solicitado a 13 especialistas, a partir do método Point Allocation	58
Tabela 3.21 Classificação da vulnerabilidade do Estuário do Tejo para os cenários B3a e B4b em km ² e percentagem pertencentes a cada classe de vulnerabilidade	59
Tabela 3.22 Área inundada, em km ² , pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2100 para o Estuário do Tejo	60
Tabela 3.23 Classificação da vulnerabilidade da Ria de Aveiro para os cenários B3a e B4b em km ² e percentagem pertencentes a cada classe de vulnerabilidade	62
Tabela 3.24 Classificação da vulnerabilidade da Ria de Aveiro, para os cenários C3a e C4b, em km ² e percentagem pertencente a cada classe de vulnerabilidade.....	63
Tabela 3.25 Matriz de Risco com definição das classes de risco resultantes da combinação das dimensões Exposição (Ex) e Vulnerabilidade (V)	65
Tabela 3.26 Distribuição da área com valor ecológico pelas freguesias do Estuário do Tejo ...	68
Tabela 3.27 Classes de Dano.....	69
Tabela 3.28 Classificação do risco do Estuário do Tejo, para os cenários B3a e B4b, em km ² e percentagem pertencente a cada classe de risco	71
Tabela 3.29 Classificação do risco do Estuário do Tejo, para os cenários C3a e C4b, em km ² e percentagem pertencente a cada classe de risco	72
Tabela 3.30 Classificação do risco da Ria de Aveiro, para os cenários B3a e B4b, em km ² e percentagem pertencente a cada classe de risco	73
Tabela 3.31 Classificação do risco da Ria de Aveiro, para os cenários C3a e C4b, em km ² e percentagem pertencente a cada classe de risco	75

Lista de Acrónimos

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
BGRI	Base Geográfica de Referenciação de Informação
BMAM	Baixa-Mar de Águas Mortas
BMAV	Baixa-Mar de Águas Vivas
BMmin	Baixa-Mar mínima
CAOP	Carta Administrativa Oficial de Portugal
CNRI	Comissão Nacional de Gestão de Riscos de Inundações
COS	Carta de Ocupação do Solo
CSI	<i>Coastal Socioeconomic Value Index</i>
CVA	<i>Costal Vulnerability Assessment</i>
CVI	<i>Coastal Vulnerability Index</i>
DGT	Direcção Geral do Território
DR	<i>Direct Rating</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
GEE	Gases do Efeito de Estufa
GPS RTK	Global Positioning System Real Time Kinematic
GTL	Grupo de Trabalho para o Litoral
ICNF	Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas
IDL	Instituto Dom Luiz
IH	Instituto Hidrográfico
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MPMAVE	Máxima Preia-Mar de Águas-Vivas Equinociais
NMM	Nível Médio do Mar
PA	<i>Point Allocation</i>
PMAM	Preia-Mar de Águas Mortas
PMAV	Preia-Mar de Águas Vivas
PMMáx	Preia-Mar Máxima
PT-TM06/ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
RENEP	<i>Rede Nacional de Estações Permanentes de GNSS</i>

ROC	<i>Rank Ordered Centroid</i>
RR	<i>Rank Reciprocal</i>
RS	<i>Rank Sum</i>
SIC	Sítios de Importância Comunitária
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SM	Sobreelevação Meteorológica
sNMM	Subida do Nível Médio do Mar
WGS84	<i>World Geodetic System</i>
WLC	<i>Weighted Linear Combination</i>
ZH	Zero Hidrográfico
ZPE	Zona de Protecção Especial

1 Introdução

1.1 Motivação

O aquecimento global é, segundo o consenso alargado da comunidade científica, inquestionável e, desde os anos 60 têm vindo a ser observados valores de emissões de gases de efeito de estufa (GEE), responsáveis pelo aumento da temperatura, nunca antes verificados. Como consequência, a atmosfera e o oceano aqueceram e a quantidade de gelo e neve global diminuiu. O último relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) de 2014, mostra que a temperatura na Europa continua a aumentar, com valores superiores a 1°C para o período entre 2002 e 2011, acima da média entre 1850-1899, e refere que o oceano se está a tornar cada vez mais quente, principalmente na coluna de água mais superficial. O aquecimento do oceano resulta numa expansão térmica com consequências sentidas já no presente e, certamente, mais gravosas no futuro, para o litoral em particular, aumentando as taxas de erosão, recuo da linha de costa, galgamentos e inundações costeiras.

Estudos recentes mostram que, ao longo do período de 1920-2000 o Nível Médio do Mar (NMM) em Cascais aumentou, cerca de 1.9 mm/ano (Antunes, 2011 e Antunes e Taborda, 2009) e, segundo Taborda e Ribeiro (2015) em média 1.6 mm/ano. Antunes (2016), refere uma taxa de 2.2 mm/ano entre 1992 e 2004 e uma taxa de 4.1 mm/ano entre 2005 e 2016.

Nos Cadernos Técnicos do PROCIV de 2010 (Ribeiro, 2010), as previsões para Portugal, no período de 1980-2100, apontam:

- Incremento substancial da temperatura média. O aquecimento será maior nas temperaturas máximas do que nas mínimas, o que levará ao aumento das amplitudes térmicas. Ao mesmo tempo, haverá aumento do gradiente térmico entre o oceano e o continente.
- Aumento do número de dias com ondas de calor e de noites tropicais, bem como o decréscimo acentuado do número de dias muito frios, deixando de existir geadas.
- Redução da precipitação média e da duração das estações das chuvas. É previsto um aumento da precipitação no inverno, com eventos de forte precipitação diária e um forte acréscimo nas outras estações.

Ainda segundo este relatório, a subida do NMM trará graves consequências para as zonas costeiras e principalmente para as zonas húmidas, como são a Ria de Aveiro e o Estuário do Tejo. As principais implicações serão:

- a) Aumento da erosão costeira natural;
- b) Ampliação do assoreamento nas zonas estuarinas e lagunares;
- c) Acentuar da perda de áreas de sapal;

É do conhecimento geral que o litoral exerce domínio sobre as restantes zonas do país, quer ao nível da instalação de atividades económicas como de estabelecimento de tecido urbano de habitação. Os números desde 2011 parecem ter aumentado, segundo o EUROSTAT, e neste

momento temos as zonas costeiras de toda a Europa, incluindo Portugal, a albergar grande parte das actividades económicas e uma grande maioria de actividades turísticas.

Adicionalmente, acresce o facto de os Estuários terem características especiais devido à sua localização, tendo um papel importante no ciclo de vida de um grande número de espécies (Savenije, 2005). Estes sistemas são o suporte de uma flora e fauna extremamente rica e diversificada, e por vezes únicas. Além da sua importância a nível ecológico, as terras que circundam os Estuários têm, geralmente um enorme potencial para a agricultura e para actividades associadas.

Todos estes factores, juntamente com o facto das zonas húmidas serem as mais afectadas, uma vez que se formam em zonas inter-tidais (Gornitz, 1991), tornam estes locais extremamente sensíveis e merecedores de grande atenção face à provável subida do NMM. A aparente certeza do agravamento das alterações climáticas e do seu impacto na subida do nível do mar, aumenta a necessidade da produção de instrumentos de apoio ao planeamento e gestão das zonas costeiras.

A Directiva Europeia 2007/60/CE (Directiva 2007/60/CE) define que as inundações podem provocar a perda de vidas e prejudicar gravemente o desenvolvimento económico de uma região, e exige para todos os estados membros uma avaliação das potenciais consequências para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas.

Perante tais factos supramencionados e comprovados cientificamente, existe uma necessidade premente de se efectuarem estudos que contribuam para uma melhoria do planeamento dos territórios costeiros com o objectivo de se minimizarem perdas e estragos irreparáveis perante o que se avizinha num futuro próximo. Assim esta dissertação pretende contribuir com a definição de uma metodologia que permita produzir informação útil para a percepção das alterações de um sistema afectado pela subida do nível médio do mar e contribuir como um elemento de apoio para a tomada de decisões, por parte das entidades responsáveis pela salvaguarda das populações e bens, assim como, para a adopção de medidas de adaptação. O planeamento de uma resposta ao crescente impacto das alterações climáticas e consequente aumento do nível médio do mar, evitará possíveis danos e poderá reduzir o impacto na população, ambiente, património cultural e actividades económicas.

1.2 Objectivos

Este estudo procura oferecer um contributo para o aumento do conhecimento relativo à produção de cartas de vulnerabilidade e de risco, que constituem importantes produtos de apoio necessários para auxiliar as entidades competentes no delineamento de planos de gestão e ordenamento do território.

Os principais objectivos desta dissertação são:

- avaliação da susceptibilidade da Ria de Aveiro e do Estuário do Tejo à subida do nível médio do mar - produção de cartografia de inundação, baseada em cenários calculados para 2050 e 2100;
- definição de uma metodologia simples e de fácil aplicação para estimação da vulnerabilidade física a uma escala local;
- produção de cartografia de risco, de elevada resolução espacial, face aos cenários de subida do NMM para as zonas em estudo que resulta da avaliação da exposição e dos potenciais danos

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são abordadas as principais problemáticas em análise nesta dissertação, com foco nos trabalhos desenvolvidos para a avaliação da vulnerabilidade física e do risco face à subida do nível médio do mar (sNMM).

Na primeira parte é feita uma revisão do estado do conhecimento actual acerca da variação do Nível Médio do Mar (NMM) e dos factores que influenciam a sua subida, para de seguida enquadrar o tipo de sistemas em estudo e qual o seu comportamento face a esta variação.

O terceiro subcapítulo é o mais longo e foca-se nas metodologias apresentadas pela comunidade científica para a produção de cartografia de vulnerabilidade física e risco de zonas costeiras face às alterações climáticas.

Por fim, é feita uma breve abordagem dos principais métodos de ponderação e agregação de critérios utilizados neste tipo de avaliações.

2.1 Variação do NMM

O NMM, segundo Antunes (2014), é um referencial geodésico usado como *datum* vertical, determinado a partir de uma superfície média do oceano. É criado com base nas leituras dos marégrafos, eliminando dos dados recolhidos as flutuações da maré e a factores meteorológicos, e é obtido com base na série de registos do nível médio do mar durante um determinado período, com referência ao *datum* utilizado (Rolim, 2014). O NMM em Portugal foi determinado com base nos registos do marégrafo de Cascais, correspondente à média das médias anuais do período compreendido entre 1882 e 1938, que define o *Datum Altimétrico Nacional de 1938*.

A variação absoluta do nível do mar é um processo não linear e complexo, resultante de diferentes mecanismos com diferentes escalas temporais, que inclui a expansão termal das águas dos oceanos, devido à absorção do calor, a adição de água doce resultante do degelo de glaciares e das coberturas de gelo (extensões de gelo) e, da descarga dos reservatórios terrestre de água doce (Rahmstorf, 2007), designada de componente eustática da variação do NMM.

Dias e Taborda (1988) citando Titus (1996), apontam os três factores que influenciam o NMM: o volume total de água presente nas bacias oceânicas, a temperatura da água a diferentes profundidades (influenciando a densidade e volume) e a forma (batimetria) das bacias oceânicas. Os autores referem ainda, que esses factores são modificados principalmente pelos processos glacio-eustáticos, glacio-isostáticos, hidro-isostáticos, tecno-eustáticos, sedimento-eustáticos e os geóido-eustáticos.

Parece consensual que o NMM global irá exceder o observado no século XX (Church *et al.*, 2013 in Taborda e Ribeiro, 2015). Antunes (2016), afirma que se verifica uma evolução com tendência crescente da taxa de sNMM cuja variação pode chegar no futuro à sua duplicação a cada 10 ou 15 anos. Contudo, a magnitude de futuras subidas do NMM permanece controversa e as projecções para o final do século XXI ainda estão sob grande incerteza e investigação (Taborda e Ribeiro, 2015).

Dias e Taborda (1988) analisaram os dados da estação maregráfica de Cascais, de modo a determinar a tendência secular do NMM do século XX, tendo obtido $1.3 \pm 0.1 \text{ mm/ano}$. Ao longo do período de 1920-2000 o NMM em Cascais aumentou, segundo Taborda e Ribeiro (2015), em média 1.6 mm/ano e, segundo Antunes (2011) e Antunes e Taborda (2009), cerca de 1.9 mm/ano . Antunes (2016) refere uma taxa de variação anual de 2.2 mm/ano entre 1992 e 2004 e uma taxa de 4.1 mm/ano entre 2005 e 2016 (Figura 2.1).

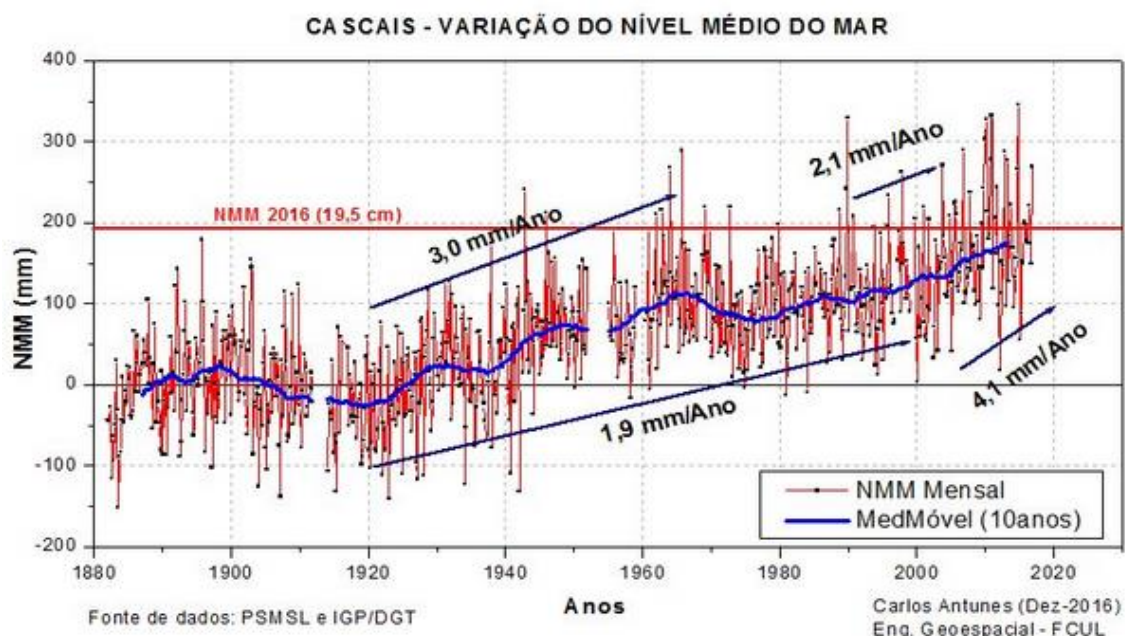


Figura 2.1 Variação secular do nível médio do mar em Cascais de 1882 a 2016 (Fonte: PSMSL e IGP/DGT; Antunes, 2016)

Segundo Freire (1999) os Estuários respondem à subida do NMM tornando-se receptores de sedimentos, causado pela diminuição do transporte para fora do Estuário. Como consequência da sNMM e da diminuição de material exportado pelos Estuários, ocorre não só erosão das zonas costeiras adjacentes, mas também alterações morfológicas nas margens do Estuário (Pethick, 1996 citado em Freire, 1999): inundação de zonas intertidais; erosão de praias e sapais; substituição da morfologia plana intertidal com canais subtidais pouco profundos por rasos de maré mais altos e canais subtidais mais profundos.

2.1.1 Maré

2.1.1.1 Maré astronómica

Segundo o Instituto Hidrográfico (IH, 2017), a maré é a oscilação do nível das águas do mar causada pela atração gravitacional do Sol e da Lua, sendo a influência da Lua bastante superior pela sua maior proximidade da Terra. As marés variam em resposta à complexa interacção da Terra, da Lua e do Sol, que provocam um número elevado de forças (Ribeiro, 2010). As variações da altura de água associadas podem ser representadas pela soma de um número finito de termos harmónicos (constituintes harmónicas). São estes parâmetros que servem de base fundamental

para a caracterização da maré num determinado local, determinadas a partir de um processo matemático designado de análise harmónica (IH, 2017; Antunes e Godinho, 2011).

Nas fases de Lua Cheia ou Lua Nova, onde a Terra, o Sol e a Lua estão alinhados em oposição ou conjunção, ocorre o somatório de forças desses astros e a amplitude de marés atinge valores máximos, dando origem a marés vivas (Rolim, 2014). Nas fases de quarto crescente ou quarto minguante, em que as posições da Lua e do Sol estão em contra fase, ocorrem as marés mortas de menor amplitude (Ribeiro, 2010). A amplitude das marés vivas é ainda maior nos equinócios (marés vivas equinociais), facto explicado pelo IH (2017) pela introdução de uma terceira constituinte que, perto dos equinócios reforça o efeito do Sol.

O movimento de translação da Lua, também conhecido como dia lunar (por o seu período de rotação coincidir com o respectivo período de translação), pode subdividir-se em períodos com durações distintas. Em Portugal Continental, incluindo o Estuário do Tejo e a Ria de Aveiro, existe uma maré do tipo semidiurna (Figura 2.2), ou seja, em que se verificam duas preia-mares (altura máxima registada após o período de enchente) e duas baixa-mares (altura mínima registada após o período de vazante) em cada dia solar (IH, 2017). A maré pode ainda ser classificada quanto à sua amplitude (Ribeiro, 2010): tipo microtidal (< 2 metros), mesotidal (2 – 4 metros) e macrotidal (> 4 metros). A Ria de Aveiro e o Estuário do Tejo são os dois sistemas mesotidais (Dias, 2008; Freire, 2006).

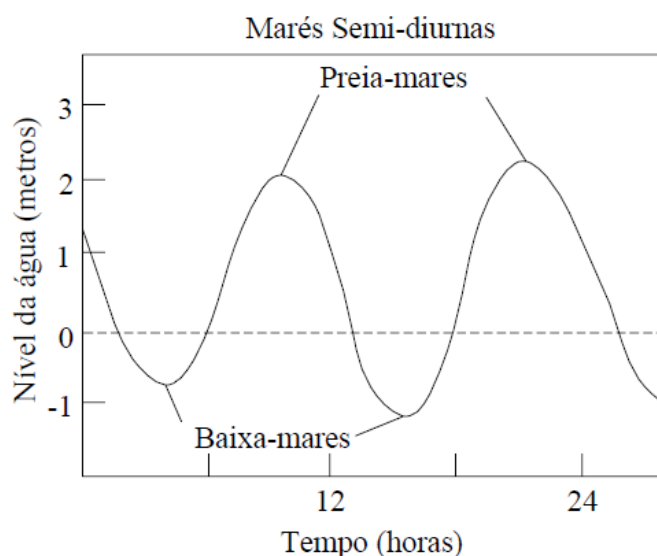


Figura 2.2 Caracterização de uma maré semi-diurna típica (Extraído de Coelho, 2005)

Rocha (2016) citando Antunes (2007) afirma que a semi-amplitude máxima da maré observada em Portugal é de 1.70 m, e pode atingir 1.80 m no caso de Viana do Castelo e 1.85 m em Cascais, excepcionalmente pode atingir 2.10 m em Lisboa por se tratar de um regime de maré estuarina.

A variação do nível da água do mar depende ainda de outros factores perturbadores, tais como a pressão atmosférica, correntes e agitação marítima. A pressão atmosférica é o mais importante dos factores não astronómicos que influenciam a subida e descida do nível do mar (IH, 2017) e que afecta o próprio nível médio diário do mar. As baixas pressões produzem um aumento do

nível das águas, enquanto as altas pressões estão associadas a uma descida do nível do mar. A variabilidade anual e inter-anual do Nível do Mar também é um factor a ter em conta.

A observação de maré é tradicionalmente feita por marégrafos de poço, que registam o nível da superfície instantânea do mar em relação a uma marca de referência. A altura de maré será dada pela soma da elevação de maré (relativa ao NMM) com o valor de Zero Hidrográfico (ZH) local (Antunes, 2012). Com o objectivo de caracterizar a maré ao longo das áreas de estudo foram utilizadas concordâncias de maré. As concordâncias de maré são parâmetros de desfaseamento da onda de maré entre dois portos que apresentam o mesmo regime de maré, habitualmente entre um porto principal e um porto secundário existente nas imediações (IH, 2017). Estes parâmetros são usados e aplicados para a determinação das tabelas de maré nos portos secundários, ou em qualquer outro ponto onde não foi observado um ano completo de registo de maré.

Os principais conceitos referentes aos níveis de maré e planos de referencia encontram-se na Figura 2.3.

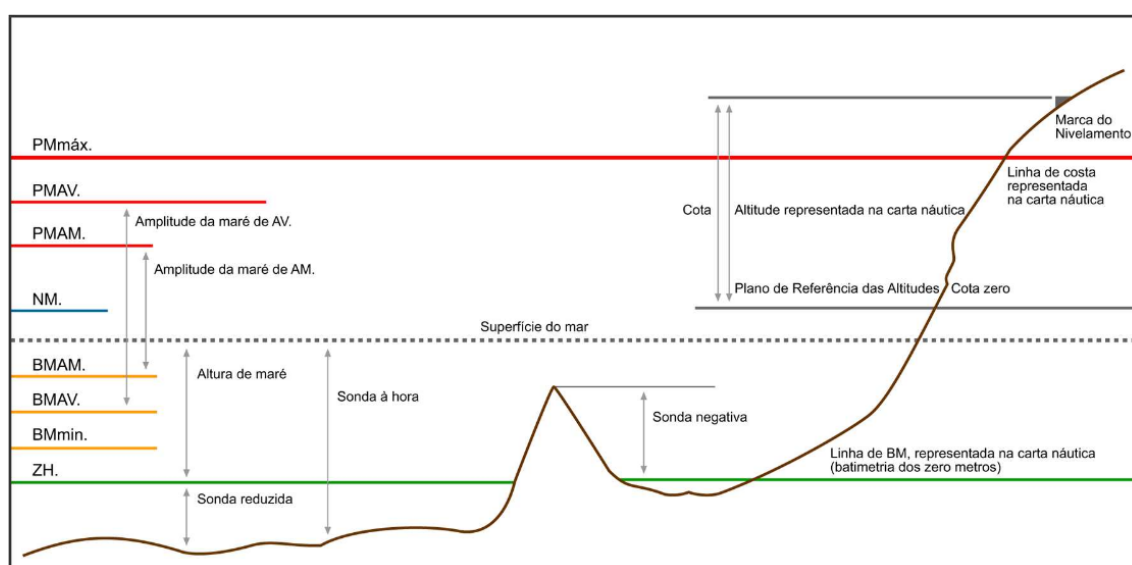


Figura 2.3 Principais conceitos referentes a níveis de maré e planos de referência (Extraído de IH, 2017)

O ZH é o nível de referência, ou *datum* vertical, utilizado em Hidrografia para a representação de profundidades (Rolim, 2014). Segundo Antunes (2012), a altura de maré é, por definição, sempre dada e definida em relação ao ZH, tal como toda a informação usada na cartografia náutica, sondas e profundidades. Este nível, em Portugal, corresponde à mais baixa das baixas-mar astronómicas registadas num período nodal (18.6 anos), acrescida do “pé de piloto” (aproximadamente 30 cm) (Antunes, 2012).

O Zero Hidrográfico é um valor constante referido ao nível médio do mar. Para o caso do Estuário do Tejo, existe um factor a considerar importante, o efeito e propagação da onda de maré ao longo do Estuário. A onda de maré ao entrar no Estuário perde velocidade, e aumenta a sua amplitude devido à conservação de energia da onda (Antunes, 2012). Antunes afirma que devido ao efeito da subida do NMM, o valor de ZH em Lisboa situa-se, nos 2.32 m e, em Cascais, nos 2.23 m abaixo do NMM de 2012. Contudo, todos os cálculos nesta dissertação consideram os valores de ZH adoptado, de 2.08 m abaixo do NMM Cascais 1938. Nos restantes portos de Portugal

Continental, incluindo o de Aveiro, o ZH fica situado a 2 m abaixo do nível NMM Cascais 1938. Nas regiões dos Açores e da Madeira, tem-se o ZH de 1.00 m e 1.40 m, respectivamente, abaixo do nível médio adoptado.

O Datum Altimétrico de Cascais de 1938, que constitui o datum vertical continental (Antunes, 2012), foi definido a partir da média das observações do nível do mar registadas no antigo marégrafo de Cascais, entre 1882 e 1938, e deu origem ao NMM de Cascais de 1938, zero altimétrico de Portugal Continental (NMM1938). O sistema de referência vertical oficial do Continente é habitualmente denominado por Cascais Helmert 38, uma vez que o *datum* está referido ao NMM em Cascais de um período cujo último ano é 1938. Segundo Antunes (2012), a marca de referência que materializa o *datum* altimétrico nacional, encontra-se a uma altitude de 4.31 m em relação ao NMM de Cascais de 1938.

Nesta dissertação a cartografia de inundação procura projectar o pior cenário possível em termos da subida do NMM. Para tal, são adicionados a uma maré de valor extremo efeitos extremos de forçamento meteorológico: a sobrelevação meteorológica (SM) e o *setup* provocado pela agitação de ondas e vento. Para a elaboração desta cartografia, o modelo digital de terreno e o modelo de maré estão ambos referidos ao sistema de altitudes Helmert 38, ou seja, relativo ao mesmo sistema de referência vertical, o NMM de Cascais de 1938.

2.1.1.2 Sobrelevação meteorológica

O termo sobrelevação ou “*storm surge*” refere-se à variação do nível do mar resultante da existência de condições meteorológicas anómalas, entre elas, variações no campo da pressão atmosférica e/ou da acção de ventos fortes e prolongados (Taborda e Dias, 1982). Segundo Vieira *et al.* (2012), quando a preia-mar de águas-vivas coincide com um episódio de SM positivo ocorrem episódios extremos de inundação das zonas costeiras. Esta grandeza é calculada através da diferença entre a maré observada e a maré astronómica, reconstituída pela análise harmónica dos registos de maré disponíveis (Vieira *et al.*, 2012).

Taborda e Dias (1992) estudaram os temporais de 14 de Fevereiro a 3 de Março de 1978 e o de 25 a 31 de Dezembro de 1981 e observaram os valores máximos a variarem entre 40 e 90 cm para a primeira tempestade e 40 e 120 cm para a segunda, estes valores foram observados para os marégrafos de Viana do Castelo, Leixões, Aveiro, Lisboa, Cascais, Tróia, Sines e Lagos. Vieira *et al.* (2012) fizeram uma análise com base nos dados observados entre 1960 e 2010 no marégrafo de Cascais, e extraem amplitudes máximas de 58, 62 e 67 cm para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente.

2.1.1.3 Agitação marítima

A agitação marítima junto à costa depende do estado do mar ao largo, da batimetria e da geometria dos fundos dentro da zona de propagação (Freire, 1999). Segundo Coelho (2005), ondas, vagas, seichas e tsunamis são diferentes tipos de agitação marítima. Devido à morfologia dos Estuários, não é possível a entrada de ondas oceânicas para a zona interior através do canal de embocadura (Freire, 1999), devido à dissipação da energia. O tipo de agitação verificado no interior destes sistemas é provocado pelo vento geradas localmente, Coelho (2005) refere a importância do

regime de ventos quando se procede a uma análise do clima de agitação, pois é por acção deste agente que se formam ondas na superfície da água, geradas ao largo ou localmente.

2.2 Estuários Fluviais

Segundo Savenije (2005), um Estuário é a transição entre dois corpos de água, um rio e o mar, apresentando características que são típicas destes dois ambientes, tornando-os sistemas de grande importância económica e ambiental. Nesta dissertação a Ria de Aveiro, será tratada como um Estuário, devido às grandes semelhanças com sistemas estuarinos (Woodroffe, 2002).

A sua localização entre rio e mar, faz com que estes sistemas tenham características hidrodinâmicas, biológicas e morfológicas distintas de outro corpo de água. Todos os Estuários apresentam acumulações de sedimentos; transporte de sedimentos; inundações ocasionais; presença de água doce na zona montante e água salgada na zona mais a jusante e são influenciados pela maré (Savenije, 2005).

Para o homem, os Estuários sempre foram de extrema importância, principalmente, como fonte de alimento e transporte. Geralmente, as zonas adjacentes ao Estuário apresentam um grande potencial para a agricultura, porque conjugado com a topografia plana, os solos são férteis e têm uma fonte de água doce. Por estas razões, as zonas costeiras mais populosas são as zonas próximas dos Estuários, o que aumenta a fragilidade destes sistemas, de natural vulnerabilidade.

Os principais factores forçadores nos Estuários são (Savenije, 2005):

- A maré
- As ondas, que no interior do Estuário dependem das condições meteorológicas
- A descarga dos rios que fornece sedimentos e água doce ao Estuário
- O transporte de sedimento ao longo da costa que pode ser o responsável pela criação de barras e restingas
- Diferença de densidades, responsável pela criação de uma corrente de fundo que transporta sedimentos de origem marinha para o interior do Estuário.

Os Estuários aluviais, onde se inserem as regiões em estudo, são Estuários que têm fundos amovíveis, compostos por sedimentos de origem marinha e fluvial, nos quais existe uma quantidade mensurável de água doce a entrar no sistema. A hidrodinâmica do Estuário pode resultar na erosão dos fundos, tornando o Estuário mais fundo e mais largo, ou na deposição de sedimentos tornando-o mais raso e mais estreito. Logo, a forma do Estuário está directamente relacionada com a hidrodinâmica presente (Savenije, 2005).

Segundo Taborda e Ribeiro (2015), o principal impacto da sNMM será a erosão e inundações das áreas pouco profundas (águas rasas), como Estuários e lagunas costeiras, mas também o desenvolvimento de uma tendência para movimentos verticais nestas áreas.

2.3 Vulnerabilidade e Risco

Desde a crescente preocupação sobre o aquecimento global pela sociedade actual nos anos 80, que os impactos da sNMM reúnem grande preocupação. A grande concentração de pessoas e bens nas zonas costeiras faz com que os potenciais impactos se prevejam muito elevados (Nicholls *et al.*, 2011). A certeza de que os impactos serão elevados faz com que seja necessário realizar estudos para perceber quais as zonas mais afectadas e quais as potenciais perdas e danos associados.

O risco e a vulnerabilidade podem ser avaliados segundo diferentes perspectivas e disciplinas, tendo em conta o tipo de ameaça, e por isso, calculados de diferentes formas. Não obstante, no âmbito desta dissertação, serão apenas revistos trabalhos realizados no contexto das alterações climáticas e seus impactos.

Existem várias definições de risco descritas na literatura. A *Society for Risk Analysis* define risco como o potencial para a ocorrência de eventos indesejados e consequências adversas para a vida humana, saúde, propriedade ou ambiente, definição também apresentada pela Directiva Europeia de 2007 (Directiva 2007/60/CE). Kaplan e Garrick (1981) fizeram a primeira introdução à teoria sobre a construção de cenários e definiram o risco como um processo analítico baseado na resposta a três questões: a) O que pode acontecer de errado? b) Qual é a probabilidade de alguma coisa com sérias consequências acontecer? e c) Quais são as consequências expectáveis se alguma coisa de errado acontecer? Estas três questões continuam a ser aceites pela maioria da comunidade científica, que em grande parte define o risco como a probabilidade para consequências em que existam bens valiosos e em que o resultado é desconhecido (IPCC, 2014).

Dois conceitos importantes e imprescindíveis na análise do risco são vulnerabilidade e a exposição. O IPCC define exposição como sendo a presença de pessoas, habitações, ecossistemas, serviços, recursos, infraestruturas e bens económicos sociais ou culturais em locais susceptíveis ao risco. A avaliação da vulnerabilidade é extremamente importante para investigar quais os impactos das alterações climáticas nos diferentes ecossistemas (Torresan, 2011).

Várias definições de vulnerabilidade têm sido apresentadas pela comunidade científica. A Estratégia Internacional para a Redução do Desastre das Nações Unidas (UN/ISDR) define vulnerabilidade como as condições determinadas por factores físicos, sociais, económicos e ambientais ou processos que aumentam a suscetibilidade de uma comunidade ao risco (Birkmann, 2007 citando a UN/ISDR). O último relatório do IPCC define vulnerabilidade como a predisposição para um local ser afectado prejudicialmente, defendendo que este conceito engloba outros como sensibilidade ou susceptibilidade ao dano e capacidade de adaptação (IPCC, 2014).

Torresan (2011) esclarece que as metodologias desenvolvidas para avaliar a vulnerabilidade têm como finalidades: 1) produzir informação que ajude a compreender como um sistema pode ser potencialmente afectado por alterações climáticas e como pode responder a estes impactos; 2) contribuir para a tomada de decisões por parte dos envolvidos nos planos de gestão e ordenamento; 3) recomendar medidas de adaptação e facilitar o desenvolvimento sustentável (Füssel, 2007).

Os métodos mais utilizados na avaliação da vulnerabilidade e risco de impactos ambientais, pode ser dividida em 4 categorias principais (Ramieri *et al.*, 2011):

1. Métodos baseados em índices

2. Aproximação baseada em indicadores
3. Sistemas de suporte à decisão baseados em Sistemas de Informação Geográfica
4. Métodos baseados em modelos computacionais dinâmicos.

Incluído na categoria 1, o método *Coastal Vulnerability Index* (CVI) é um dos métodos mais utilizados e de mais fácil aplicação no que diz respeito à avaliação da vulnerabilidade costeira, em particular devido a erosão ou inundação. Esta abordagem na sua forma original, proposta por Gornitz (1991), combina 7 variáveis entendidas como chave, subsidência, declive, taxa erosão/acreção, geomorfologia, altura de onda, alcance da maré e elevação. Geralmente, este método utiliza uma quantificação das variáveis através de escalas semi-quantitativas de 1 a 5, em que o valor 1 corresponde a um baixo contributo para a vulnerabilidade de um local, e 5 um contributo muito elevado.

Nos anos seguintes à proposta de Gornitz vários autores fizeram a sua adaptação do método, alterando o número total de variáveis e também a tipologia das variáveis principais. Por exemplo, Abuodha e Woodroof (2006), aplicaram um CVI adaptado a 7 praias da costa Australiana, adicionaram variáveis como a altura das dunas, tipo de barreira e tipo de praia, variáveis que no seu entender eram essenciais para descrever a vulnerabilidade da costa deste país.

Ozyur (2007) e Ozyurt e Ergin (2010) desenvolveram o CVI para avaliar impactos decorrentes, exclusivamente, da subida do nível do mar. Nesta abordagem foram criados 5 sub-índices de impacto, cada um correspondente a um nível da subida do NMM diferente, onde são contabilizados parâmetros físicos e sociais, ambos com o mesmo peso para o impacto final.

McLaughlin e Cooper (2010) mostram uma definição de uma perspectiva próxima das anteriores, também preocupada com o impacto na população humana, em que a vulnerabilidade é avaliada em função da natureza física da costa, a natureza da perturbação e o grau com que estas mudanças afectam as actividades humanas ou os seus bens (como explicado na equação 2.1, extraído de McLaughlin e Cooper (2010)).

$$\text{Vulnerabilidade} = f(\text{características costeiras (resiliência e susceptibilidade)} + \text{forçamento costeiro} + \text{factores socioeconómicos}) \quad (2.1)$$

Os autores defendem um método cujas variáveis pertencem a 3 grupos: i) natureza da costa, ii) o grau com que a costa está exposta à energia das ondas, iii) principais elementos socio-económicos. Em conjunto são usadas para definir um índice de vulnerabilidade costeira (Figura 2.4). Neste estudo é dada importância à escolha das variáveis consoante a escala que está a ser avaliada, ou seja, segundo os autores, à escala da região norte da Irlanda, a geologia é uma variável essencial para a determinação da vulnerabilidade, contudo a uma escala mais pormenorizada a geologia passa a ser uma variável obsoleta.

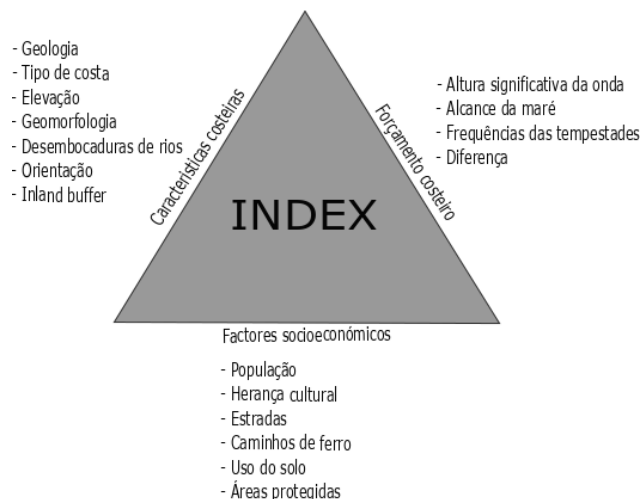


Figura 2.4 Classificação dos sub-índices que compõem o índice de vulnerabilidade costeira (Adaptado de McLaughlin e Cooper, 2011)

O projecto EUROSION (Doody *et al.*, 2004) utilizou uma abordagem baseada em indicadores com a finalidade de caracterizar a Europa quanto ao risco de erosão. Este projecto utiliza 13 indicadores que suportam a avaliação do risco de erosão costeira: 1) Subida relativa do nível médio do mar; 2) Tendência da evolução da costa; 3) Mudanças na costa de estáveis para erosão ou acreção; 4) Nível da água mais elevado; 5) Urbanização da costa (numa faixa de 10 km); 6) Redução de sedimento fornecido pelo rio; 7) Geologia; 8) Elevação; 9) Proteções existentes; 10) População residente no Raio de Influência da Erosão ou Inundação (RICE); 11) Urbanização da costa; 12) Áreas urbanizada e industrializadas dentro do RICE; 13) Áreas de elevado valor ecológico dentro do RICE.

Cada indicador é avaliado segundo uma escala semi-quantitativa que resulta numa avaliação que caracteriza cada faixa com níveis de preocupação desde baixo a elevado.

Benassai *et al.* (2015) propõem uma metodologia que combina vários índices com o objectivo final de encontrar um valor de risco para cada região, focado essencialmente nas praias. Começam por prever qual a morfologia da costa para os anos de estudo através de projecções da taxa de subsidência, e calculam os mapas de inundação através da conjugação desta informação com as previsões do NMM para essas datas. Para a avaliação do risco e vulnerabilidade, aplicam o método de *Costal Vulnerability Assessment* (CVA). A metodologia CVA começa por identificar as variáveis chave que representam processos significativos para a subida do nível do mar, e de seguida atribui a cada variável um peso, consoante a sua influência num determinado local. Este índice contabiliza taxas de erosão, alcance da onda e estabilidade de estruturas costeiras.

Na categoria 3 (Sistemas de suporte à decisão baseados em SIG, o *GIS-based Support SYstem for Coastal* (DESYCO) (CMCC, 2017) foi concebido como um sistema de apoio à decisão para a avaliação e gestão de múltiplos impactos das alterações climáticas em áreas costeiras e ecossistemas relacionados (praias, zonas húmidas, florestas, entre outras). A implementação do DESYCO é feita em 3 fases: 1) construção de cenários, com a finalidade de definir futuros cenários causados por alterações climáticas; 2) avaliação integrada dos impactos e riscos; 3) gestão de impactos e riscos, focada no suporte na definição de medidas de adaptação com o intuito de reduzir potenciais riscos. No âmbito do projecto DESYCO, é aplicada uma metodologia de *Regional Risk Assessment* (RRA), baseada em análise de decisões multicritério, com o objectivo de identificar áreas em risco. De acordo com a metodologia RRA, os indicadores de

vulnerabilidade ou índices são classificados em 3 categorias principais: a) factores de susceptibilidade, que descrevem o grau com que o receptor é afectado, benéfica ou prejudicialmente; b) factores de valor, onde são identificados os valores socio-económicos ou ambientais que merecem ser preservados para o interesse da população; c) factores físicos, características físicas do local (ex.: elevação, distância à linha de costa).

Por fim, estão os métodos baseados em modelos computacionais dinâmicos, geralmente mais precisos, mas que exigem, na sua generalidade, um nível extremamente elevado de detalhe e tempo de processamento, na sua generalidade. O relatório do *European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation* (ETC CCA) de 2011 (Ramieri *et al.*, 2011) faz uma divisão destes métodos em duas categorias: *sector models* e *integrated assessment models*. Os primeiros têm como objectivo focar-se na análise da vulnerabilidade de sistemas costeiros a um processo costeiro específico (ex.: erosão ou intrusão salina), enquanto que os modelos integrados (*integrated assessment models*) visam avaliar a vulnerabilidade de sistemas costeiros a múltiplos impactos.

Dentro da primeira categoria existem, como exemplos, os modelos (Ramieri *et al.*, 2011):

- RACE (*Risk Assessment of Coastal Erosion*), concebido para avaliar a vulnerabilidade a grandes escalas (nacional e regional), mas também usado para avaliações a escalas de mais pormenor;
- BTLESS e SLIMM, foram ambos construídos para analisar alterações em zonas costeiras e avaliar a sua vulnerabilidade.

Como exemplo de modelos incluídos na segunda categoria existem:

- DIVA (*Dynamic Interactive Vulnerability Assessment model*), pensado para avaliar os efeitos biofísicos e socio-económicos provocados pela sNMM;
- SimCLIM, usado para integrar processos físicos complexos com o objectivo de simular também impactos socio-económicos e biofísicos resultantes de alterações climáticas, incluído eventos extremos;
- RegIS (*Regional Impact Simulator*), construído para avaliar os efeitos das alterações climáticas em duas regiões do Reino Unido. Este modelo inclui impactos de cheias costeiras e fluviais, alterações no uso do solo, ecossistemas costeiros, habitats de zonas húmidas e recursos hídricos.

É ainda interessante referir o projecto Risc-KIT que fornece uma metodologia sistemática, designada *Coastal Risk Assessment Framework* (CRAF), no qual é feita uma primeira abordagem ao impacto e risco a uma escala regional, com o objectivo de localizar *hotspots*, locais caracterizados com alto risco (Viavattene *et al.*, 2017). O método CRAF utiliza dois níveis de análise, uma abordagem simples de larga escala usando o índice CVI e numa segunda fase uma abordagem integrada recorrendo a modelos computacionais que fazem uma previsão de alterações morfológicas segundo diferentes cenários.

No âmbito de estudos de escala mais pormenorizada, Prandle e Lane (2015) avaliaram a sensibilidade dos Estuários aos impactos da sNMM. Estes autores procuraram propor uma metodologia para avaliação da vulnerabilidade assente em 4 índices, que indicam os possíveis impactos das alterações climáticas em Estuários dominados pela maré: (1) Transporte de sedimentos; (2) Energia; (3) Mobilização de fundos; (4) Intrusão salina. Estes índices foram calculados em função da amplitude da maré e da profundidade na embocadura do Estuário.

Tal como os autores anteriores, Ervine *et al.* (2007) utilizam modelos computacionais para a avaliação da vulnerabilidade de dois Estuários à inundação e à intrusão salina, provocadas pelas alterações climáticas. Ambos os trabalhos têm em conta os seguintes parâmetros: caudal fluvial; profundidade do Estuário; alcance da maré; elevação da maré; aceleração devido à gravidade; entre outros, e utilizam-nos para modelação dos Estuários e prever o seu comportamento.

Outra componente importante na avaliação do risco, além das variáveis físicas, será a vulnerabilidade socio-económica, o dano potencial e a exposição. Muitos autores entendem que a avaliação da vulnerabilidade só fará sentido se englobarmos variáveis socio-económicas. Gornitz (1993) sugere que é o valor dos recursos sociais e económicos dentro da região em risco que vai determinar quais os esforços, se necessários, para proteger essa área. Cutter *et al.* (2003) propõem um método para a avaliação da vulnerabilidade socio-económica que tem em conta a resiliência da população a um determinado perigo. Identificam e descrevem quais os factores que mais afectam a vulnerabilidade social e económica, e descrevem características como a escolaridade, a taxa de desemprego, o género dominante, desenvolvimento industrial e comercial, entre outros. Guillard-Gonçalves *et al.* (2015) aplicaram este método ao concelho de Lisboa e apontam as principais dificuldades na sua execução como a dificuldade na recolha dos dados e definição dos factores influenciadores. Esta abordagem foi também seguida pelo projecto CIRAC (CIRAC, 2017).

O valor socio-económico segundo Aucelli *et al.* (2015) e Benassai *et al.* (2015), é calculado a partir de uma abordagem ao índice CSI (*Coastal Socioeconomic Value Index*), baseado no relatório de Salman *et al.* (2004). Este índice depende das características do uso do solo e da população, existentes nas zonas definidas como susceptíveis à inundação, e é o resultado da soma de 4 variáveis: população residente; percentagem de área urbanizada; percentagem de área com valor ecológico; e, a percentagem do aumento da área urbanizada; todas elas dentro da área afectada pela erosão costeira. A população residente foi calculada com base no produto da área natural, rural e urbana com a densidade populacional respectiva. Esta metodologia define ainda a interpretação do dano potencial. Sem recorrer a curvas de dano, de difícil concepção, classifica-se as zonas como zonas de dano muito elevado a zonas de baixo dano, consoante a densidade de infraestruturas de habitação. A exposição é calculada a partir do produto do dano com o índice socio-económico e, por fim, o nível de risco é resultado do produto da vulnerabilidade com a exposição. Estes valores são agrupados em matrizes de risco, de mais fácil interpretação.

2.4 Ponderação e agregação de critérios

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são usados, como já é do conhecimento geral, como ferramenta de apoio à tomada de decisão, como sejam, as decisões e políticas de ordenamento do território ou decisões e políticas sobre medidas a tomar face a uma ameaça com repercussões ao nível espacial (Cardona, 2015; Aucelli *et al.*, 2016; Sheppard *et al.*, 2012).

O principal objetivo dos métodos de apoio à decisão em problemas multicritério é auxiliar o decisor na selecção de alternativas a partir de um conjunto de critérios (Jankowski, 1995). A produção de cartografia de vulnerabilidade e risco, envolve múltiplos critérios. A partir das variáveis de entrada (critérios) num SIG, o problema passa por agregar as camadas de acordo com uma regra definida. No contexto SIG, existem dois tipos de procedimento mais comuns (Jiang e Eastman, 2000): o primeiro envolve sobreposições do tipo *booleano*, em que os critérios são determinados a partir de intervalos de valores definidos consoante a sua adequabilidade para a

produção de mapas booleanos, que posteriormente são combinados a partir de operadores lógicos, como por exemplo de intersecção (AND) ou união (OR); o segundo é conhecido como *Weighted Linear Combination* (WLC) ou combinação linear pesada. Neste último, os critérios são normalizados e depois combinados através da importância atribuída a cada um, sendo o resultado apresentado sob a forma de mapas de estrutura matricial e de valores contínuos para toda a área de estudo.

Segundo Malczewski (2000) e Larsson *et al.* (2015), a regra WLC é a mais utilizada em ambiente SIG, por ser de fácil implementação através de operações algébricas e de fácil compreensão por parte dos decisores (Malczewski, 2000). Por estas razões, a técnica WLC será a utilizada nesta dissertação, a qual avalia cada alternativa, a_i , através da seguinte função (2.2):

$$V(x_i) = \sum_j w_j v_j(x_i) = \sum_j w_j r_{ij} \quad (2.2)$$

Em que w_j é o peso normalizado, obedecendo à regra de que $\sum_j w_j = 1$, $v_j(x_i)$ é o valor da alternativa para o atributo j , e r_{ij} é o atributo transformado numa escala comparável.

Em problemas de natureza multicritério, semelhante ao que é analisado nesta dissertação, as alternativas podem ser entidades geográficas, enquanto os critérios podem ser aqueles que ajudam a avaliar o risco ou a vulnerabilidade. Neste contexto, a matéria mais relevante, dentro deste universo que são os problemas multicritério e os seus métodos, é a forma como são atribuídos os pesos.

Os pesos representam a importância relativa dos atributos e influenciam, fortemente, o produto final. A atribuição de pesos a cada variável pode ser feita a partir de juízos individuais ou de um grupo, geralmente de especialistas no tema estudado. Tendo em conta que os riscos, quer sejam naturais, industriais ou de outro tipo, são conhecidos com um grande nível de incerteza, recorre-se por vezes ao conhecimento de especialistas. O conhecimento das pessoas consultadas, não sendo completamente certo, confere ao estudo um nível mais elevado de credibilidade e aumenta o seu nível de certeza (Cooke e Goossens, 2004). Knol *et al.* (2010) definem a licitação de especialistas como sendo uma abordagem estruturada para consultar especialistas em assuntos cujos parâmetros estão sujeitos a incertezas.

Knol *et al.* (2008), apresentam-nos quais as principais características das incertezas existentes que levarão à necessidade de incluir a licitação e a agregação na avaliação. São elas:

- Incerteza no contexto;
- Incerteza nos dados;
- Incerteza do modelo, a nível dos dados de entrada, da definição de parâmetros, da estrutura do problema ou a nível técnico;
- Incerteza do produto final;

Em geral, as condições que garantem a necessidade de um processo de licitação mais elaborada incluem (Knol *et al.*, 2008 citando Kotra, 1996):

- Dificuldade na obtenção de dados empíricos;
- Grande número de incertezas;
- Existência de mais do que um modelo aceitável para explicar o problema;
- Necessidade de uma avaliação técnica.

A partir da inclusão da licitação de especialistas, em teoria, será possível contornar grande parte destas incertezas. Contudo, nem sempre é possível realizar estes processos, seja pela falta de tempo ou de orçamento disponível.

Um aspecto comum a todos os métodos de licitação de pesos é o de ser solicitada a atribuição de um valor numérico a cada critério, porém esta solicitação pode ser, por vezes, difícil de concretizar. Alguns dos problemas, descritos por vários autores, na licitação de pesos incluem a exigência cognitiva, a subjectividade das avaliações e a dificuldade em expressar ideias (Larsson *et al.*, 2015). Estes autores identificam quatro características essenciais para um método de licitação bem-sucedido: i) não necessitar de um conhecimento aprofundado de análise de decisão; ii) não ser demasiado exigente a nível cognitivo; iii) não requerer muito tempo e iv) permitir a extração de informação fornecida pelos entrevistados.

Um dos métodos mais básicos para a comparação da importância de diferentes critérios é a ordenação dos critérios por preferência (*ranking*), tornando a licitação mais acessível pois não exige a atribuição de valores concretos. Outros processos foram propostos em que exigem a atribuição de um peso a cada critério, de rápida execução, como por exemplo, os métodos designados *Point Allocation* (PA) e *Direct Rating* (DR) (Doyle *et al.*, 1997), ou mais exigentes a nível cognitivo, como os métodos *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART) (Von Winterfeldt e Edwards, 1986 citado por Alfares, 2008), SWING (Wang, 2009 citando Jia, 1998 e Von Winterfeldt, 1986), *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Saaty, 1987), entre outros.

A partir da ordenação feita nos métodos falados em primeiro lugar, é possível extrair pesos. Existem vários procedimentos propostos com este fim. Como exemplo, existem os métodos *Rank Sum* (RS), *Rank Reciprocal* (RR) e *Rank Ordered Centroid* (ROC) (Riabacke, 2012 citando Stillwell, 1981; Barron, 1992). Todos eles assentes no princípio simples de que a ordenação feita reflecte a importância dada a cada critério, e é assumido para um conjunto de pesos que $w_1 > w_2 > \dots > w_n$, $\sum w_i = 1$ e $0 \leq w_i$ (Danielson e Ekenberg, 2017).

Os métodos PA e DR solicitam a atribuição de pontuações a cada critério. No método PA é dado um total de pontos (ex.: 100) para o decisor atribuir a cada critério, em que quanto maior for a pontuação dada maior será a importância atribuída (Bottomley, 2000). O segundo método não coloca um limite para o número de pontos a atribuir. No final as pontuações são normalizadas pelo total de pontos dado.

A metodologia AHP, publicado pela primeira vez por Saaty em 1980, funciona através de uma estrutura hierárquica reduzindo o problema multicritério a comparações par a par baseadas numa escala definida. Contudo, a transformação de escalas para valores numéricos é muito questionada (Larsson *et al.*, 2015), pois o facto de se basear em termos descritivos faz com que esteja sujeita ao entendimento de cada um, deixando de ser objectivo.

2.5 Enquadramento Legal

A Directiva 2007/60/CE da União Europeia, transposta para a legislação nacional, define o objectivo de “(...) estabelecer um quadro para a avaliação e gestão dos riscos e inundações, a fim de se reduzir as consequências associadas às inundações”. Exige para todos os estados membros uma avaliação das potenciais consequências prejudiciais das futuras inundações para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas. Esta avaliação deve ser apresentada sob a forma de cartas de zonas inundáveis e cartas de risco de inundações.

Esta Directiva fornece indicações sobre a informação a incluir nos diferentes materiais de apoio à gestão. As cartas de zonas inundáveis devem compreender os seguintes cenários: a) fraca probabilidade de cheias ou cenários de fenómenos extremos; b) probabilidade média de cheias (periodicidade provável igual ou superior a 100 anos); c) probabilidade elevada de cheias, quando aplicável. As cartas de risco, devem incluir informação sobre: a) número indicativo de habitantes potencialmente afectados; b) tipo de actividade económica potencialmente afectada; c) instalações que possam causar poluição accidental em casos de inundação, e zonas protegidas; d) outras informações relevantes.

Esta lei é transposta para o direito nacional através do Decreto-Lei nº 115/2010 de 22 de Outubro. Com esta publicação é criada a Comissão Nacional de Gestão de Riscos de Inundações (CNRI), destinada a acompanhar a aplicação da Directiva 2007/60/CE.

O Grupo de Trabalho para o Litoral (GTL, 2014) foi constituído pelo Despacho nº 6574/2014, com o objectivo de “desenvolver uma reflexão aprofundada sobre as zonas costeiras, que conduza à definição de um conjunto de medidas que permitam, no médio prazo, alterar a exposição”, à vulnerabilidade, “incluindo nessa reflexão o desenvolvimento sustentável em cenários de alterações climáticas” (Despacho nº 6574/2014).

3 Metodologia proposta para os casos de estudo da Ria de Aveiro e Estuário do Tejo

Neste capítulo será descrito o processo metodológico seguido nesta dissertação, desde a aquisição de dados à produção de cartografia de inundação, vulnerabilidade e risco para o Estuário do Tejo e para a Ria de Aveiro.

Em primeiro lugar é feita uma descrição das zonas de estudo quanto às suas características físicas intrínsecas, sociais e económicas e influência da maré e dos factores forçadores. No subcapítulo seguinte será feita uma descrição de todos os dados necessários para as diferentes fases de processamento, identificando as diversas fontes de recolha. De seguida é feita a descrição do processamento e a transformação a que os dados foram sujeitos, e por fim, são descritas as metodologias adoptadas para a produção dos produtos cartográficos finais.

O processamento e transformação dos dados foi feito, em grande parte, no software ArcGis (ESRI®), versão 10.4, em particular o ArcMap. Foram ainda utilizados os softwares R e Fortran. Cada fase de processamento e transformação dos dados encontra-se descrita em cada capítulo correspondente.

Os Modelos Digitais de Terreno que serviram de base para toda a cartografia produzida foram construídos a partir de dados fornecidos pela DGT, para uma resolução espacial de 2 m e sujeitos, neste trabalho, a uma validação com dados de precisão superior.

Para a produção dos cenários de inundação foram utilizados os valores de sNMM e taxa de aceleração descritos por Antunes (2016) aos quais foram adicionados eventos meteorológicos extremos de SM e agitação provocada pelo vento, descritos por Antunes (2014) e Vieira *et al.* (2012).

A cartografia de vulnerabilidade foi baseada na combinação dos mapas de inundação e na conjugação de 4 parâmetros para o caso do Estuário do Tejo (Caudal Fluvial; Geologia; Distância à MPMAVE (Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais) e Ocupação do solo) e 3 para o caso da Ria de Aveiro (Geologia; Distância à MPMAVE e Ocupação do solo). Estes parâmetros foram ponderados através de uma licitação de especialistas e agrupados pelo método WLC (*item 2.4*).

Por fim, os mapas de risco resultaram da união da cartografia anterior com a exposição e o dano, calculados de acordo com as características sociais e económicas de cada região.

É importante referir que os termos “Estuário do Tejo” e “Ria de Aveiro”, “estuário” e “ria” serão utilizados para fazer referência à área em estudo, que corresponde à área abrangida pelos MDT, com excepção do subcapítulo da descrição da maré e das características físicas em que os termos servirão para fazer referência ao sistema físico.

3.1 Caracterização das áreas de estudo

3.1.1 Ria de Aveiro

3.1.1.1 Características Físicas

A Ria de Aveiro, designada por alguns de Laguna de Aveiro, é uma estrutura geológica relativamente recente. “Resultou da deposição de sedimentos num pronunciado golfo que se desenvolvia entre Espinho e o Cabo Mondego, durante o século X. (...) a acumulação de areias começou na região de Esmoriz, a que se seguiu a formação de uma flecha arenosa que, avançando para sul se foi interpondo entre a vasta baía e o mar. O deslocamento deu-se progressivamente para a área da Vagueira e seguiu para a de Mira, sendo evidente o assoreamento no século XVIII” (Lemos, 2008).

A Ria de Aveiro é hoje uma laguna de baixa profundidade e extensas zonas inter-tidais, situada na costa NW de Portugal (40°38'N, 8°45'W), estende-se por 45 km desde Ovar até Mira (Figura 3.1) e tem a largura máxima de 8.5 km (Oliveira, 1988 e Reis, 1993 citados por Dias, 2001). Constitui o maior sistema lagunar português com abertura permanente ao mar. A montante recebe inputs de água doce, principalmente do Rio Vouga. A jusante, a embocadura constitui a zona de entrada da maré oceânica (Rosa *et al.*, 2012).

A área total da Ria que está coberta durante a preia-mar, varia entre 83 km² em maré viva e 66 km² em maré morta (Dias, 2001) e a profundidade média é de cerca de 1 metro, relativamente ao ZH. As profundidades máximas são observadas no canal da embocadura, cerca de 30 metros. São também observadas profundidades elevadas (cerca de 10 m) nos canais de navegação, que são mantidos artificialmente através da realização de dragagens (Dias, 2009 citando Dias e Lopes, 2006). A comunicação com o oceano faz-se através do canal da Barra com 1.3 km de comprimento, 350 m de largura e 20 m de profundidade (Rosa *et al.*, 2012).

A estrutura da Ria de Aveiro tem uma geometria bastante complexa, caracterizada pela presença de sapais, marinhas de sal e canais meandrizados de dimensão muito reduzida, dos canais que a constituem destacam-se 4 canais principais: S. Jacinto-Ovar, Mira e Ílhavo, com orientação Norte-Sul e Espinheiro com direção Este-Oeste.

A Bacia Sedimentar de Aveiro, encontra-se implantada no sector setentrional da Bacia Lusitânica e no grande grupo de unidades sedimentares que a Orla Meso-Cenozóica Ocidental Portuguesa constitui. É uma vasta bacia sedimentar depositada sobre um soco Paleozóico (Marinheiro, 2008 citando Teixeira e Zbyszewsky, 1976; Barbosa, 1981; JAPA, 1993), fica situada entre o Maciço Hespérico, delimitado pela falha Porto-Tomar (a Leste), o alinhamento Tocha-Febres-Mogofores (a Sul) e o Oceano Atlântico (a Oeste) (Marinheiro, 2008).

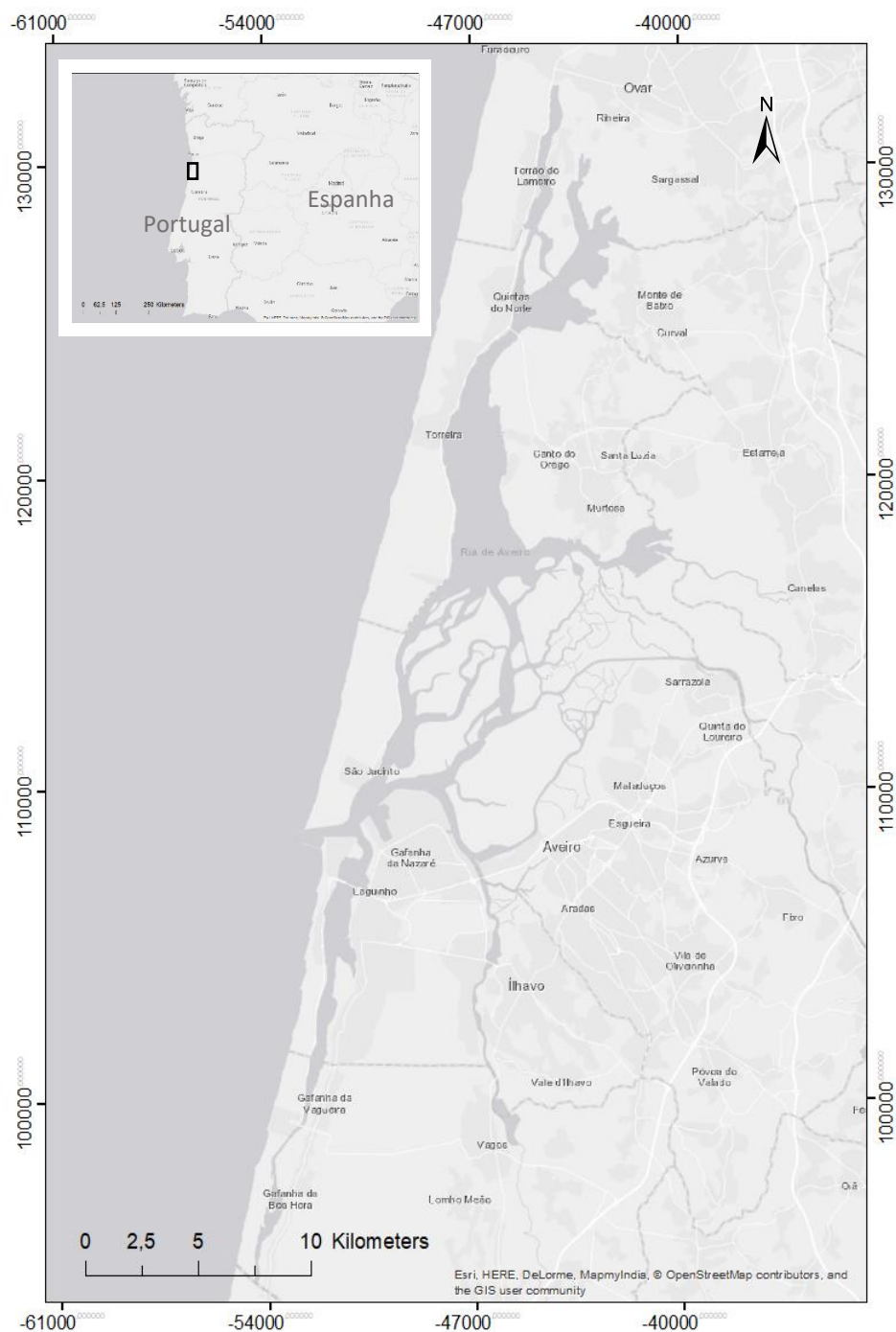


Figura 3.1 Enquadramento geográfico da Ria de Aveiro (Sistema de coordenadas: PT-TM06/ETRS89)

É preenchida, essencialmente, por sedimentos do Cretácico e do Quaternário, depositados em ambientes predominantemente lagunares com episódios, ou mais marinhos, ou mais continentais. Tudo indica que, desde o Cretácico Superior, o sistema sedimentar Laguna-Ilha Barreira, ocupa uma parte significativa da Bacia Sedimentar de Aveiro (Benta, 2007). O substrato da Bacia Sedimentar de Aveiro é essencialmente formado por xistos e micaxistos do Proterozóico, aflorantes na bordadura NE da bacia e posicionados a profundidades crescentes para Oeste (Benta, 2007). As formações ocorrentes são estratigraficamente datadas do Quaternário (Holocénico e Plistocénico) e do Cretácico (Apciano e Maastrichtiano) representados, respectivamente, por

Depósitos Modernos (aluviões actuais, areias de praia e areias de dunas), Depósitos do Plistocénico (depósitos de praias antigas, terraços fluviais e blocos residuais) e Formações do Cretácico (Benta, 2007).

Marinheiro (2008), sugere que um processo de acumulação de sedimentos é o mais provável de acontecer nas áreas muito baixas da laguna. Lopes *et al.* (2013), afirmam que a Ria pode ser considerada estável, com excepção de situações de maior caudal fluvial, originando estratificação vertical. Contudo, a sul da barra de Aveiro verificou-se, segundo Rosa *et al.* (2012), uma forte erosão, provocando o recuo da linha de costa. O défice sedimentar continua a existir (Rosa *et al.*, 2012) e a fazer com que esta zona seja uma zona mais vulnerável, aumentando a vulnerabilidade dos canais mais a sul da Ria.

3.1.1.2 Maré

Segundo Dias (2009), as principais acções forçadoras da dinâmica da Ria são: 1) a maré oceânica, que se propaga de Sul para Norte ao longo da costa oeste de Portugal e faz sentir os seus efeitos mesmo na extremidade montante dos vários canais; 2) o caudal dos rios Vouga, Antuã, Boco, Caster, Gonde e Fontela e de diversos ribeiros e cursos de água que desaguam na extremidade montante do Canal de Mira; e 3) o vento, que actua especialmente nas zonas mais largas da laguna, em períodos curtos. A circulação no interior da laguna é dominada pela maré, cuja amplitude varia entre 3.3 m em maré viva e 1.0 m em maré morta. As ondas de maré, ao atingirem a barra, interagem com as correntes de agitação local e propagam-se para o interior do sistema lagunar (Marinheiro, 2008).

A entrada de água doce a partir dos rios é pequena, comparativamente com a entrada de água salgada a partir das marés (Dias *et al.*, 1999 citado em Dias *et al.*, 2003), tal como provam os baixos valores de concordâncias de amplitude de maré usadas neste trabalho e extraídas das publicações de tabelas de maré do IH. O Vouga é o principal rio que desagua na Ria, segundo Marinheiro (2008), os caudais provenientes deste rio estão na ordem de 10 m³/s a picos de 150m³/s.

3.1.1.3 Características Sociais e Económicas

A Ria de Aveiro abrange um total de 8 concelhos: Albergaria-a-Velha, Aveiro, Estarreja, Ílhavo, Mira, Murtosa, Ovar e Vagos, e um total de 31 freguesias. No total a Ria de Aveiro, segundo os Censos de 2011 alberga 66355 habitantes, e constitui um sistema com uma importância económica considerável a nível local, regional e nacional (Lillebø *et al.*, 2011).

A Ria de Aveiro tem como polos principais a aglomeração urbana o concelho de Ílhavo e Aveiro com a maior concentração de serviços, equipamentos, infraestruturas de mobilidade, infraestruturas logísticas portuárias, ferroviárias e concentrações de actividades industriais e logísticas e como polos secundários Estarreja, Murtosa e Ovar. Como exemplo de actividades económicas podem destacar-se: as infraestruturas portuárias; a indústria de salga e secagem, congelados e conservas; aquicultura (piscicultura, moluscicultura, costeira e do largo); o turismo, as actividades recreativas e a agricultura. No município de Aveiro a indústria transformadora tem cerca de 3499 empregados, representando cerca de 40% de emprego neste sector (Alves, 2013).

A Ria suporta ainda actividades de pesca apeada e lúdica, de acordo com Lillebø *et al.* (2011) a exploração de bivalves na Ria envolve cerca de mil profissionais e representa cerca de 1,6 Milhões de euros.

Além da importância económica a Ria de Aveiro tem uma elevada importância ecológica (ICNF, 2000). A Ria de Aveiro é composta, quase na totalidade, por zonas de importância ecológica, o ICNF destaca a existência de extensas zonas de sapal, salinas, áreas significativas de caniço e importantes áreas associadas a áreas agrícolas. Estas áreas apresentam-se como importantes locais de alimentação e reprodução para diversas espécies de aves, sendo que a área alberga regularmente mais de 20 mil aves aquáticas e um total de 173 espécies. Além da área designada por Zonas de Protecção Especial (ZPE) e Sítios de Importância Comunitária (SIC), que se sobrepõem quase na totalidade, a Ria de Aveiro inclui uma área protegida importante, que são as Dunas de São Jacinto.

3.1.2 Estuário do Tejo

3.1.2.1 Características Físicas

O Estuário do Tejo localiza-se na costa ocidental portuguesa, na região da Estremadura e Ribatejo meridionais, sendo limitado pelos paralelos 38°40'N e 39°05'N e pelos meridianos 9°20'W e 8°45'W (Figura 3.2), e desenvolve-se segundo as direcções NNE-SSW e ENE-WSW. É um dos maiores Estuários da Europa, ocupando uma área que varia entre 300 km² (em baixa-mar) e 340 m² (em preia-mar) (Amorim, 2015). O limite montante da intrusão salina em condições hidrológicas normais situa-se em Vila Franca de Xira, a cerca de 50 km da embocadura e o limite montante da maré dinâmica no Estuário situa-se em Muge, a cerca de 80 km da embocadura. O limite jusante do Estuário está localizado no Canal do Tejo, entre Lisboa e Trafaria.

As margens do Tejo apresentam forte assimetria, com a margem norte quase totalmente urbana e de traçado regular, e a margem sul, de traçado fortemente irregular e recortado, com algumas zonas agrícolas e naturais, albergando a maior parte da Reserva Natural do Estuário do Tejo.

O Estuário do Tejo apresenta uma mistura sedimentar resultante de acarreo fluvial e de elementos de origem marinha. Os sedimentos arenosos de origem fluvial não chegam ao interior do Estuário, situando-se em Cacilhas (Almada) o limite montante dos sedimentos provenientes do oceano (Freire, 2003 citado por Amorim, 2015). Os estudos existentes mais recentes apontam para um Estuário com um sistema de assoreamento intenso (Silva, 2013). Silva (2013) citando Bettencourt *et al.* (2003), apresenta uma taxa média de sedimentação de 1.1 cm/ano para o estuário em geral. Silva (2013) faz referência também a Martin *et al.* (1982) que estimou uma taxa de 1.5 cm/ano.

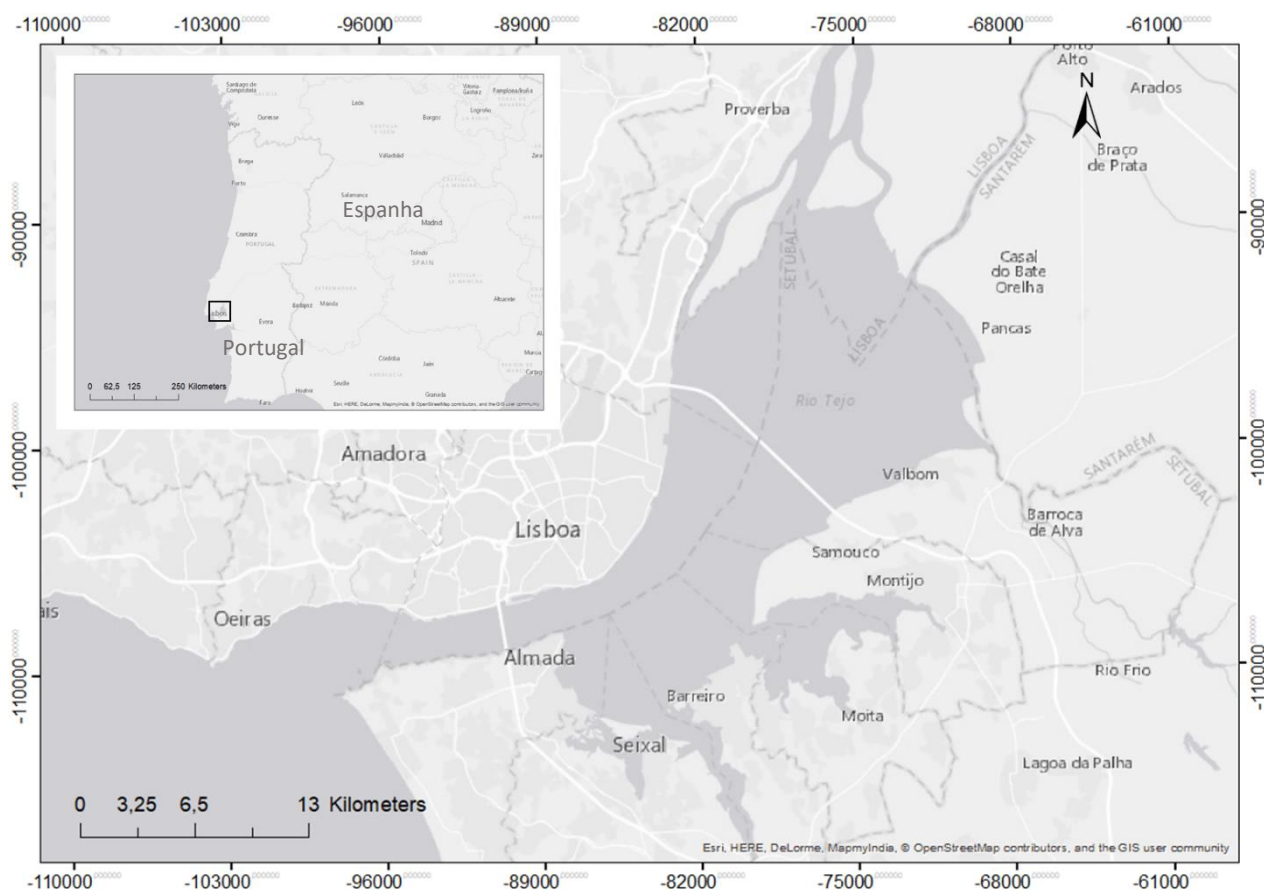


Figura 3.2 Enquadramento geográfico do Estuário do Tejo (Sistema de coordenadas: PTM06-ETRS89)

Em termos morfológicos, Bettencourt *et al.* (2003), divide o Estuário em 4 sectores distintos:

O sector mais a montante, designado por sector fluvial, vai desde Muge até Vila Franca de Xira e caracteriza-se por apresentar um canal principal com 600 m de largura, instalado numa vasta planície aluvial. Neste troço, a água é doce ou de baixa salinidade e o leito do rio é composto essencialmente por areias. Ocorrem neste sector mouchões marginais que ladeiam o canal principal.

O sector seguinte, sector superior, estende-se de Vila Franca de Xira até Sacavém. A presença de formas de acumulação, como mouchões e barras submersas, origina a ocorrência de vários canais. O sector médio abrange a área entre Sacavém e a Praça do Comércio. Na margem esquerda deste troço desaguam os esteiros do Montijo e Barreiro, criando uma bacia pouco profunda designada por Mar da Palha. Nesta secção existem também diversas restingas e baías. Por último, o sector inferior corresponde ao canal de ligação com o Atlântico, que se desenvolve entre a Praça do Comércio e o Bugio. Esta zona apresenta já características predominantemente marinhas.

Quanto à geologia em que se insere o Estuário, a bacia hidrográfica do rio Tejo desenvolve-se em grande parte no Maciço Hespérico atravessando, a norte e nordeste, afloramentos de xistos, grauvaques, quartzitos e granitos da Zona Centro-Ibérica, e a sudeste e leste rochas pelíticas, carbonatadas e granitoides da Ossa Morena (Freire, 1999). A noroeste e a oeste, corta as séries sedimentares essencialmente carbonatadas e detríticas da Orla Mesozóica Ocidental. Desenvolve

uma extensa planície aluvial quando atravessa as formações terciárias e quaternárias da chamada “Bacia Cenozóica do Baixo-Tejo” e Sado (Freire, 1999).

3.1.2.2 Maré

Este é um estuário classificado como mesotidal, sujeito a uma maré com período semidiurno (Freire *et al.*, 2006). As amplitudes das marés variam entre os 0.75 m em maré morta, no exterior do Estuário, e os 4.3 m em maré viva na zona montante (Rilo *et al.*, 2014). A amplitude de maré aumenta também para montante, atingindo uma amplitude máxima na zona da Póvoa de Santa Iria (Bettencourt *et al.*, 2003). A componente fluvial do sistema estuarino deve-se quase exclusivamente à contribuição do rio Tejo, com caudal médio em Santarém de 392.9 m³/s (Loureiro, 1979 citado por Freire *et al.*, 2006). O segundo afluente mais importante do Estuário é o rio Sorraia, na margem esquerda, cujo caudal médio anual é cerca de 9% do caudal do Tejo em Ómnias-Santarém (Freire *et al.*, 2006).

Quanto à sobrelevação meteorológica no estuário, Vieira *et al.* (2012) analisaram um período de dados de 1960 a 2010 para Cascais e extraíram amplitudes máximas de 58, 62 e 67 cm para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente. Embora não haja dados disponíveis sobre a ocorrência e acção deste fenómeno a montante de Lisboa, no interior do estuário, a sobrelevação pode ser importante nesta zona devido à sua área extensa e profundidade média reduzida Freire (1999).

Com características mesotidais, o estuário apresenta condições de geração local de ondas devido à extensão da zona interior e a sua orientação relativamente aos ventos dominantes, do quadrante norte (Freire *et al.*, 2006). O vento é um dos agentes climáticos que mais interfere na hidrodinâmica do Estuário interno, quer através da formação de vagas (agitação provocada pelo vento), quer através da geração de correntes de retorno junto ao fundo (Freire, 1999).

3.1.2.3 Características Sociais e Económicas

O Estuário do Tejo, o maior Estuário da Europa Ocidental, desempenha, segundo a ARH Tejo (ARH e GOT, 2009), um papel fundamental para a conservação da natureza e da biodiversidade, é um elemento de elevado valor paisagístico e com enorme potencial para o desenvolvimento de actividades culturais, recreativas e de lazer e serve de suporte para inúmeras importantes actividades económicas incluindo actividades de importância geo-estratégica de âmbito nacional. São da maior relevância as valências inerentes à exploração dos recursos naturais do próprio Estuário, como a pesca, a piscicultura e a aquicultura e outras actividades económicas inerentes a um meio aquático de transição, bem como as valências relacionadas com o plano de água enquanto suporte e meio de deslocação de pessoas e bens, como são as actividades portuárias, logísticas e de transportes (ARH e GOT, 2009).

A área estudada tem, segundo o Censos de 2011, um total de 143429 habitantes e afecta um total de 19 concelhos. Da avaliação da ocupação do solo é possível retirar que área estudada do Estuário do Tejo é constituída essencialmente por espaços agrícolas. Na região mais próxima da embocadura é onde estão concentradas as áreas urbanas e os aglomerados industriais. Embora em pequena área relativa, existem ao longo da área do Estuário estruturas importantes para os concelhos e para o país. Na margem Norte do Estuário estão situados dos monumentos mais

importantes da história de Portugal como o Mosteiro dos Jerónimos e a Torre de Belém, e na margem sul importantes estruturas de logística comercial e industrial.

Como referido anteriormente o estuário tem também grande importância a nível ecológico. A reserva natural do Tejo abrange, segundo o ICNF (ICNF, 2000), uma área de 14.416 há, que inclui uma extensa superfície de águas estuarinas, campos de vasas recortados por esteiros, mouchões, sapais, salinas e terrenos aluvionares agrícolas (lezírias). Insere-se na zona mais a montante do estuário distribuindo-se pelos concelhos de Alcochete, Benavente e Vila Franca e Xira. O estuário alberga regularmente mais de 100.000 aves aquáticas (ICNF, 2000).

3.2 Processo metodológico

A metodologia desenvolvida neste estudo divide-se em quatro fases distintas:

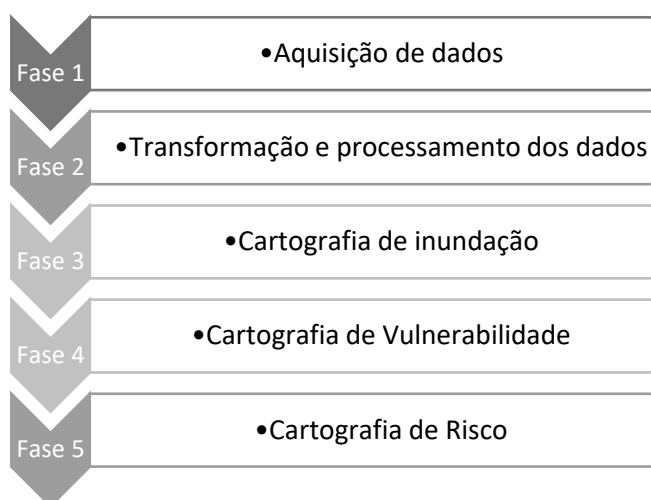


Figura 3.3 Workflow metodológico

De seguida faz-se uma descrição de cada uma das etapas da metodologia seguindo o *workflow* da Figura 3.3.

3.2.1 Fase 1 – Aquisição de Dados

Na primeira fase foram seleccionados e adquiridos os dados para a realização deste estudo, os quais se encontravam, na sua maioria disponíveis em sítios da Internet disponibilizados por entidades públicas.

Para a construção dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) foram utilizados pontos cotados com resolução de 2 metros, obtidos de fotografia aérea digital nas zonas costeiras de Portugal Continental com uma resolução espacial (GSD) de 10 cm, obtida no ano de 2008. No caso da Ria de Aveiro foram utilizados pontos obtidos a partir de um levantamento com tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) durante o ano de 2011. Para a sua validação foram usados dados geodésicos disponíveis através de serviços web pela DGT, nomeadamente, marcas de nivelamento pertencentes à Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão e pontos da Rede Nacional Gravimétrica. Para a validação do MDT da Ria de Aveiro, além desta informação foi utilizada informação disponibilizada por algumas câmaras municipais que compõem a área ocupada pela Ria, esta informação corresponde às redes de apoio topográfico recolhidas por estas entidades (Câmara de Aveiro; Câmara de Murtosa; Câmara de Vagos e Câmara de Ovar).

Para o caso do MDT do Estuário do Tejo, foi feita uma validação independente através de dados adicionais obtidos em duas saídas de campo, adquiridos directamente por posicionamento com GPS RTK, ligado à rede RENE (serviço público da Rede Nacional de Estações Permanentes da DGT).

Para a construção dos cenários de inundação, os valores de maré foram calculados neste estudo pelo modelo de previsão de Marés Astronómicas da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Antunes, 2007). Os dados usados para a interpolação das superfícies de máxima preia-mar são referentes à correcção em altura da Preia-Mar de Águas-Vivas e foram obtidos das Tabelas de Maré do Instituto Hidrográfico (IH) de 2017 (Figura 3.10) e completados com alguns dados da FCUL.

Para a avaliação da vulnerabilidade física a informação relativa à geologia foi retirada da carta geológica de Portugal, produzida à escala de 1:50 000. A ocupação do solo foi extraída da Carta de Ocupação do Solo de 2010 (COS 2010) e os valores utilizados para o caudal fluvial foram recolhidos de trabalhos científicos realizados para as áreas de estudo. A informação necessária para a construção dos mapas de risco inclui a população residente, área ecológica e área urbanizada e foi agrupada por Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI).

A Tabela 3.1 sintetiza os metadados da informação usada neste estudo. Nesta tabela, o campo fonte indica a entidade que cede os dados e o ano de produção dos mesmos pelas respetivas entidades.

Tabela 3.1 Descrição dos dados utilizados com a indicação da fonte de recolha e formato em que foram recolhidos

Dados	Fonte	Formato	Observações
Pontos cotados obtidos por fotografia aérea digital	DGT, 2008	.xyz	Ficheiros xyz com pontos distados 2 m
Pontos cotados obtidos com tecnologia LiDAR	DGT, 2011	.xyz	Ficheiros xyz com pontos distados 2 m
Carta de Ocupação do Solo de 2010 (COS 2010)	DGT, 2010	<i>Shapefile</i> do tipo polígono	<i>Shapefile</i> do tipo polígono organizada em 5 níveis de detalhe
Carta Administrativa Oficial de Portugal de 2015 (CAOP 2015)	DGT, 2015	<i>Shapefile</i> do tipo polígono	<i>Shapefile</i> do tipo polígono com as divisões administrativas em vigor em 2015
BGRI	INE, 2011	<i>Shapefile</i> do tipo polígono	Informação referente às unidades estatísticas dos Censos de 2011
População Residente	INE, 2011	<i>Shapefile</i> do tipo polígono	Número de indivíduos por BGRI correspondente aos Censos de 2011
Área Urbanizada	DGT, 2010	<i>Shapefile</i> do tipo polígono	Classes 1.1, 1.2 e 1.4 da COS 2010

Área Ecológica	ICNF, 2000	<i>Shapefile</i> do tipo polígono	Zonas de Protecção Especial (ZPE) e Sítios de Importância Comunitária (SIC)
Pontos cotados das redes de apoio topográfico de Câmaras Municipais	Sites das Câmaras Municipais de Aveiro, Vagos, Murtosa e Ovar	Mapa <i>online</i>	Mapa <i>online</i> com informação altimétrica e coordenadas (WGS84) de cada ponto da rede de apoio topográfica
Carta Geológica 1:50 000	LNEG, 1996	Serviço wms (<i>raster</i>)	<i>Raster</i> de visualização em ambiente <i>Arcmap</i>
Marcas de Nivelamento	DGT, 2011	Serviço wms	Pontos não editáveis, de visualização em ambiente ArcMap
Rede Gravimétrica	DGT, 2002	Serviço wms	Pontos não editáveis, de visualização em ambiente <i>Arcmap</i>
Concordâncias	IH, 2017	Tabela alfanumérica	Tabela com informação das coordenadas (WGS84) e concordâncias para cada porto secundário

3.2.2 Fase 2 – Processamento e Transformação

3.2.2.1 Altimetria

Como referido anteriormente, os MDT foram construídos com base em pontos cotados obtidos de fotografia aérea digital e obtidos a partir de um levantamento com tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*), com resolução espacial de 2 m.

Partindo de um conjunto de 4139 ficheiros referentes ao voo de 2008 e de 1143 ficheiros referentes ao levantamento feito em 2011, em formato xyz, foram criadas listas com as referências das cartas que cobriam as áreas de estudo. No *software* Fortran foi realizada uma junção de todas as cartas, através da operação de *merge*, num só ficheiro em formato csv (*comma separated values*). Nesta etapa foram seleccionados apenas os pontos que se encontravam abaixo dos 6.5 m e acima dos 0 m, visto que o pior cenário colocado neste trabalho não excede os 6 m, com o objectivo de facilitar o processamento posterior. Esta selecção foi feita apenas para o MDT do Estuário do Tejo, o MDT da Ria de Aveiro foi construído com todas as cotas existentes. Também com o intuito de diminuir o tempo de processamento, foi necessário dividir o ficheiro com os pontos altimétricos em secções, usando para o efeito o software R®.

Em ambiente ArcMap a informação, inicialmente em tabelas, foi projectada para o sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89 e a partir dos pontos obtidos foram gerados ficheiros numa estrutura matricial (*raster*) efectuando uma conversão em que a cada ponto corresponde uma célula (*pixel*), uma vez que a malha de pontos original é uma malha regular, sendo usado para o

feito a ferramenta *Point to Raster*. Por fim, todos os ficheiros *raster* foram compilados num só ficheiro, através da ferramenta *Mosaic to New Raster*.

Na Figura 3.4 seguinte pode ser observado um resumo de todo o processamento para a produção dos MDT usados neste estudo.

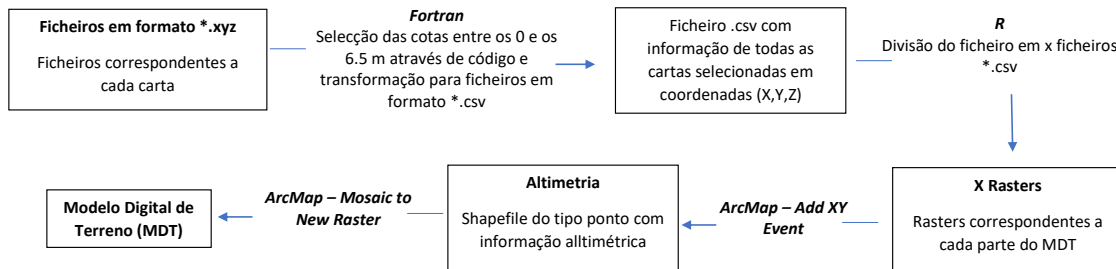


Figura 3.4 Esquema do processamento seguido para a produção dos MDT

Durante a fase de análise dos MDT produzidos foram identificados alguns erros, referentes à presença de elementos de vegetação, edifícios e zonas de água, quando na realidade os dados deveriam apresentar pontos referentes ao solo e não a qualquer objecto sobre o solo. Estes erros resultam de problemas de processamento dos dados LiDAR no formato raw, realizado pela entidade fonte, e que foram anteriores à disponibilização dos mesmos. Neste estudo, após terem sido detectados alguns destes erros (*outliers*) optou-se por não se proceder à correcção da totalidade dos erros devido à escassez de tempo e meios para o fazer, resultando assim na existência de lacunas nos mapas finais, como a não classificação de pontos susceptíveis e o aspecto rendilhado da cartografia. De seguida são apresentados alguns exemplos do tipo de erros identificados nos modelos. Na Figura 3.5 podemos visualizar o topo de um edifício que não

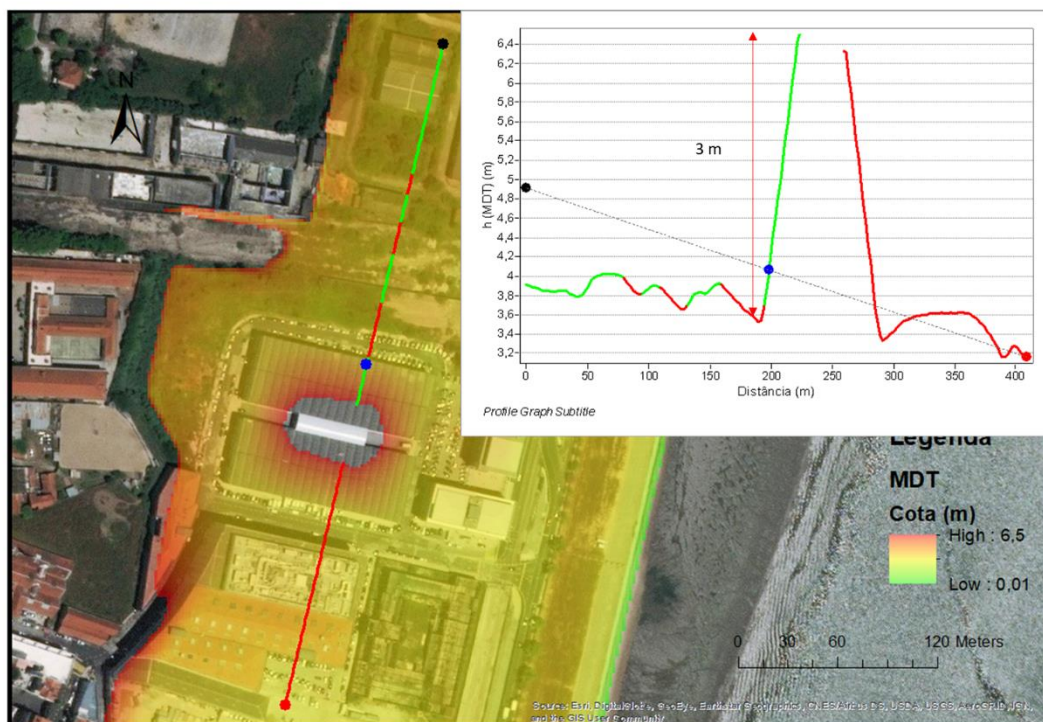


Figura 3.5 Exemplo de um erro no MDT do Estuário do Tejo e perfil do MDT na proximidade do erro

deveria constar neste conjunto de dados e o respetivo perfil altimétrico que comprova a variabilidade altimétrica atribuída à presença do mesmo onde se observar uma diferença de 3 m, aproximadamente, entre o terreno e a cota do edifício.

Na Figura 3.6 apresenta-se um exemplo para a Ria de Aveiro. Neste caso existe uma fração do terreno que surge com uma cota superior 2 metros relativamente à cota do terreno, esta diferença deve-se à presença de um aglomerado de árvores. A correção deste tipo de erros é fundamental, pois a sua existência pode levar a uma classificação errada desta área quanto à probabilidade de inundação e posteriormente à classe de vulnerabilidade e risco.

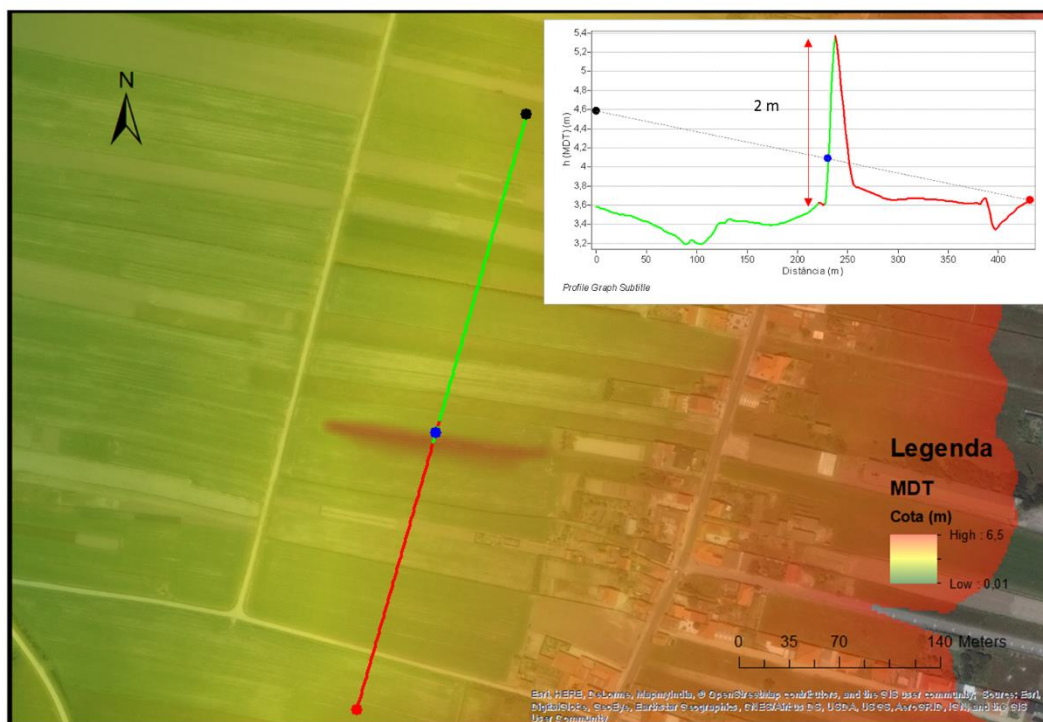
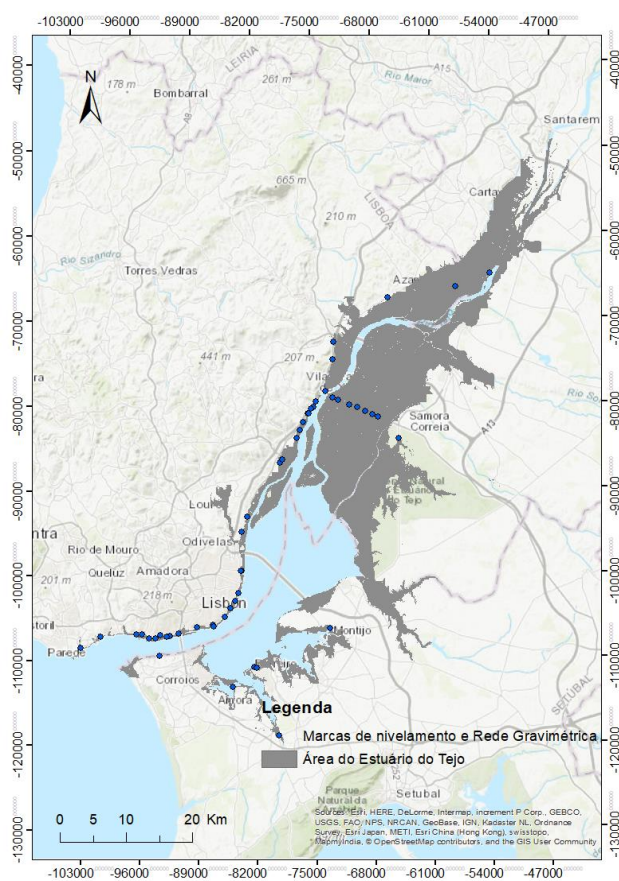


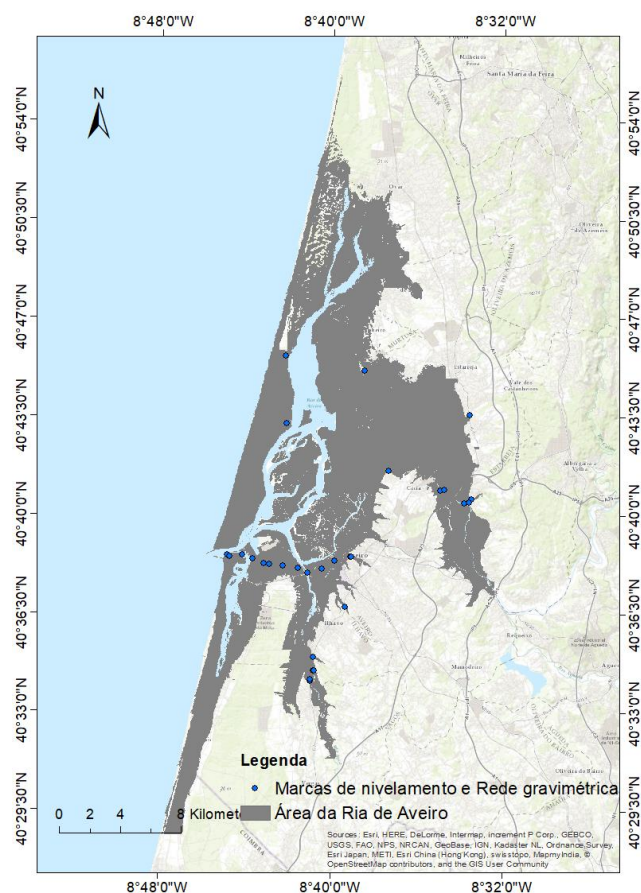
Figura 3.6 Exemplo de um erro no MDT da Ria de Aveiro e perfil do MDT na proximidade do erro

Os erros associados à criação do MDT podem ocorrer em todas as fases do seu processamento, desde a aquisição da informação ao tratamento, com a eliminação de pontos cotados em edifícios ou árvores (Höhle e Höhle, 2009). É essencial saber qual o erro associado a cada elemento utilizado na produção da cartografia final, principalmente do MDT que constitui a base de todos os produtos cartográficos a produzir no âmbito deste estudo.

A validação dos modelos foi feita numa primeira fase, com recurso aos dados disponibilizados pela DGT, e de rigor posicional superior. Para ambos os modelos foram utilizados pontos das duas redes (gravimétrica e de nivelamento) disponíveis. Inicialmente, foram usados 11 pontos para a validação do modelo digital de terreno da Ria de Aveiro, e 42 para o Estuário do Tejo, da Rede Gravimétrica (Figura 3.7). A partir da Rede de Nivelamento Geométrico foram retirados 19 pontos para a Ria de Aveiro e 84 para o Estuário do Tejo (Figura 3.7).



(a)

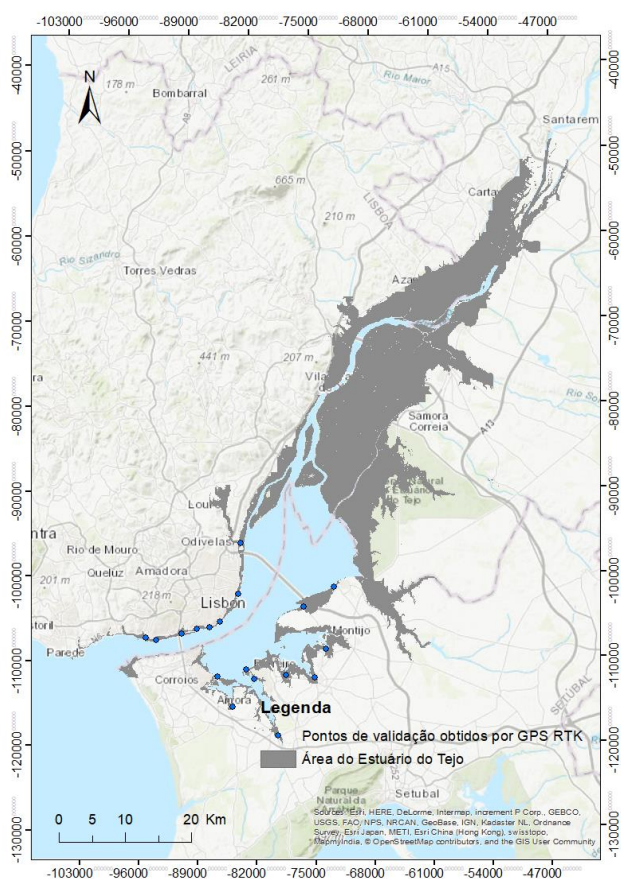


(b)

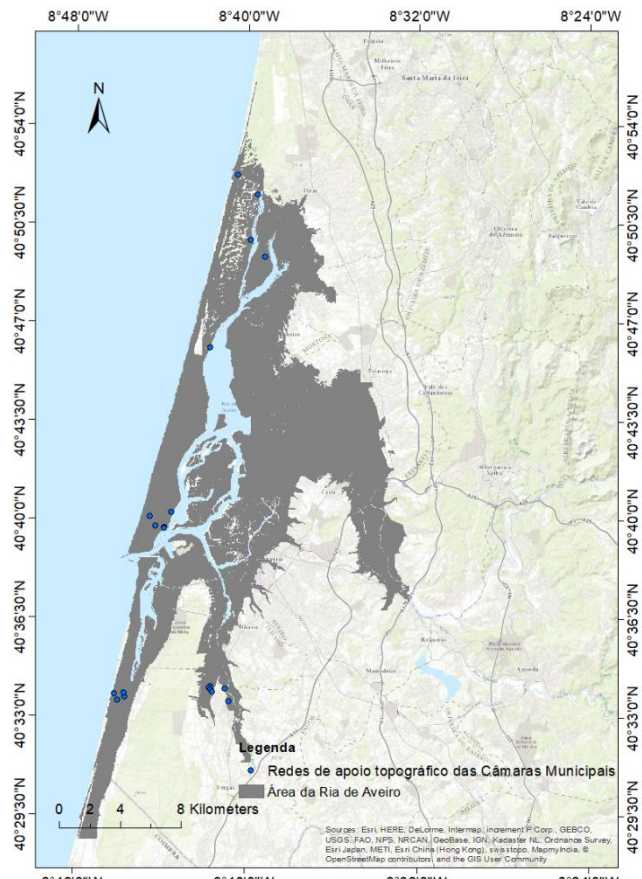
Figura 3.7 Distribuição dos pontos usados para a validação do MDT de (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro, pertencentes à Rede de Nivelamento Geométrico e à Rede Gravimétrica de Portugal Continental

Para a validação do MDT da Ria de Aveiro, além desta informação foi utilizada informação disponibilizada por algumas câmaras municipais que compõem a área ocupada pela Ria, esta informação corresponde às redes de apoio topográfico recolhidas por estas entidades. No total foram recolhidos 15 pontos, das câmaras municipais de Aveiro, Murtosa, Vagos e Ovar.

Para o caso do MDT do Estuário do Tejo, foi feita uma validação independente através de dados adicionais obtidos em duas saídas de campo, directamente pelo método de GPS RTK. Nesta saída de campo foi utilizada uma estação total GS15 tendo sido recolhidos 80 pontos no total. O elevado número de pontos deve-se ao facto de terem sido recolhidos, pelo menos 4 pontos com boa precisão em cada local (precisão igual ou inferior a 20 cm). Foi realizada a média do conjunto de pontos para cada estação, o que resultou em 18 pontos.



(a)



(b)

Figura 3.8 Distribuição dos pontos extra usados para a validação do MDT de (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro, pertencentes aos pontos obtidos por GPS-RTK e às redes de apoio topográfico das Câmaras Municipais, respectivamente

Os valores das cotas dos pontos de controlo foram então comparados com os valores das cotas nos modelos produzidos e verificou-se que alguns apresentavam resíduos muito elevados, tendo esses pontos sido eliminados. Os resíduos anormais verificados foram atribuídos a erros na marcação das coordenadas no momento do levantamento para a construção das redes de apoio topográfico. O erro associado a cada modelo foi calculado através da comparação das cotas dos modelos com as cotas das redes de apoio topográfico, ou seja:

$$\text{erro} = h_{\text{MDT}} - h_{\text{RedeApoio}} \quad (3.1)$$

onde h_{MDT} corresponde à cota do MDT e $h_{\text{RedeApoio}}$ corresponde à coordenada altimétrica do respectivo ponto relativo a uma das redes de apoio usadas para validação. Este cálculo foi feito em ambiente *ArcMap*, extraindo para cada ponto da camada dos pontos das redes de apoio os valores correspondentes dos *pixels* dos MDT's, através da ferramenta *Extract Values to Points*, procedendo-se posteriormente ao cálculo das respectivas diferenças.

A média dos erros obtidos (diferença entre a cota do MDT e a cota das redes usadas para a validação) foi de 0.2 m para o Estuário do Tejo e 0.007 m para a Ria de Aveiro. O desvio padrão para o MDT do Estuário foi de 0.34 m e para a Ria de 0.44 m. A estatística da segunda fase de validação, foi a seguinte: os pontos obtidos por GS15 nas duas saídas de campo, resultaram num

desvio padrão de 0.34 m e uma média de 0.0006 m. A validação a partir das redes de apoio das Câmaras Municipais, resultaram 0.34 m de desvio padrão e 0.2 m para o MDT da Ria de Aveiro.

Os pontos obtidos a partir das duas fases de validação foram agrupados e utilizados em conjunto para a validação dos modelos. A estatística resultante foi a apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Estatística da validação feita aos MDT produzidos para as duas regiões

	Número total de pontos	Desvio padrão (σ) (m)	Média (m)
Estuário do Tejo	83	0.34	0.2
Ria de Aveiro	40	0.44	0.14

Segundo as normas técnicas (DGT, 2013) é possível considerar um modelo válido quando o desvio padrão da validação do mesmo se encontra abaixo do valor de 0.4 m. Ambos os modelos foram considerados válidos apesar do valor para o MDT da Ria de Aveiro estar ligeiramente acima do aceite pela DGT, contudo, este foi aceite levando também em conta a utilização de redes de menor precisão como são as redes de apoio topográfico das Câmaras Municipais.

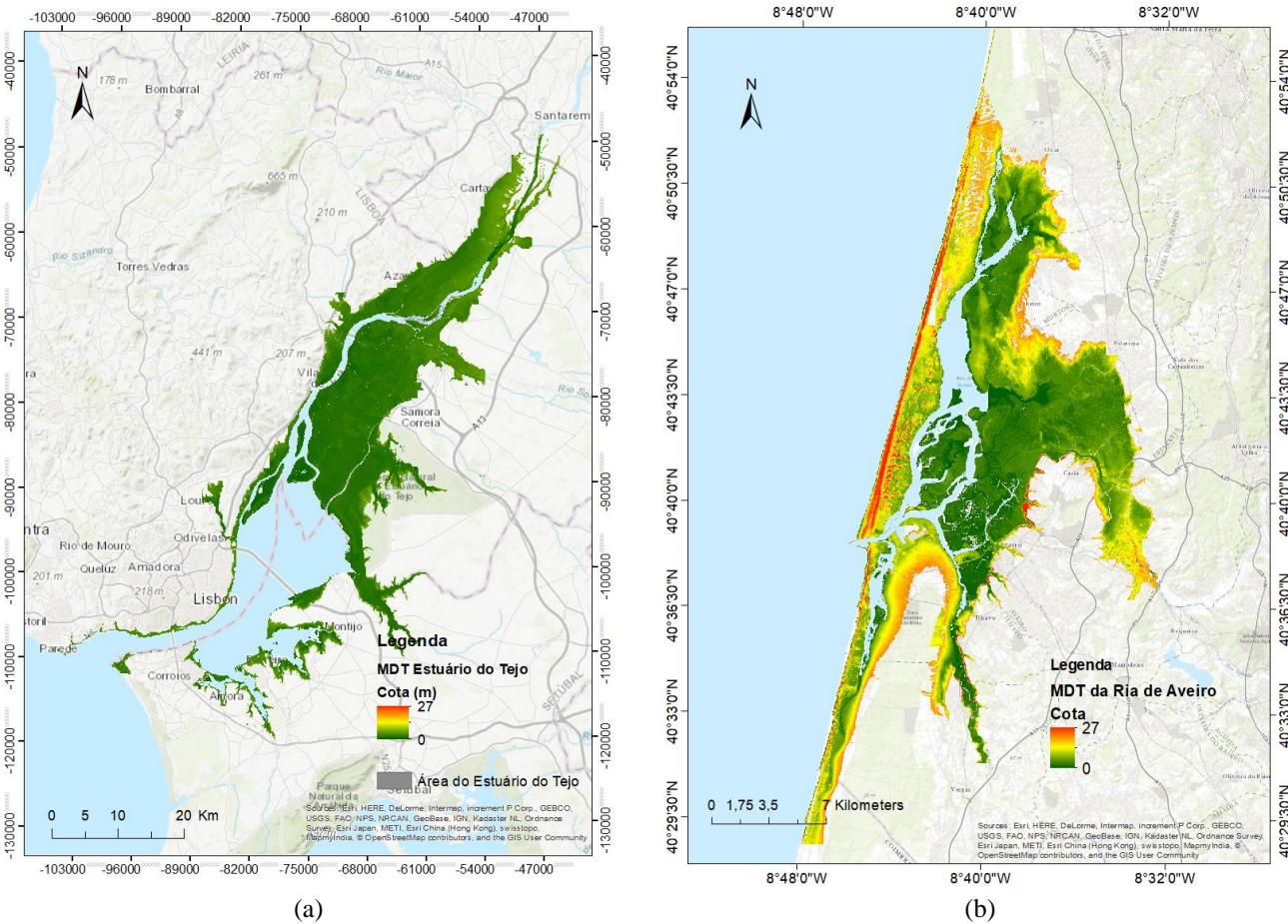


Figura 3.9 Modelos Digitais de Terrenos produzidos para o (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro (Unidades de cota em metros (m))

3.2.2.2 Maré

Para a produção das cartas de inundação importa avaliar os valores de maré, calculados neste estudo pelo modelo de previsão de Marés Astronómicas da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL, Antunes, 2007). Este modelo resulta da análise harmónica dos dados obtidos a partir do marégrafo de Cascais e utilizam uma aceleração e taxa inicial de sNMM descritas por Antunes (2016) e trabalhos anteriores. Estes modelos resultam da estimação das constituintes harmónicas realizada por análise harmónica aos dados de registos de maré dos anos de 2010 e 1999, para o Estuário do Tejo e para a Ria de Aveiro, respectivamente. O ano de referência utilizado foi o de 2015, correspondendo a um ano de máximas marés equinociais, porque a respectiva maré astronómica corresponde a um ano em que a Lua se encontra mais próximo da Terra, causando “super-marés”, ou seja, marés que correspondem a valores extremos. Uma configuração que se repete a cada período de 4 a 5 anos, correspondente a uma periodicidade quatri-nodal (Antunes, 2007).

A partir dos modelos harmónicos foi calculada a curva de referência relativa acumulada (percentil de níveis de submersão) do nível de maré extrema referente a um ano de referência (Rocha, 2016).

A metodologia utilizada para a obtenção de cotas para cada cenário de inundação foi baseada em Rocha (2016). Foram calculados os percentis de submersão de maré para os dois períodos de retorno em estudo, 50 e 100 anos, com a adição dos valores de projecção do NMM (sNMM) respectivos. Consideraram-se dois modelos na adição de eventos meteorológicos, o primeiro apenas com a sobrelevação meteorológica (SM) para os dois períodos de retorno (a) (Fórmula 3.3), e o segundo com a componente adicional do *setup* de ondas de vento (b) (Fórmula 3.4).

$$\text{Modelo a)} = \text{Maré} + \text{SM} + \text{sNMM} \quad (3.2)$$

$$\text{Modelo b)} = \text{Maré} + \text{SM} + \text{sNMM} + \text{setup}_{\text{Vento}} \quad (3.3)$$

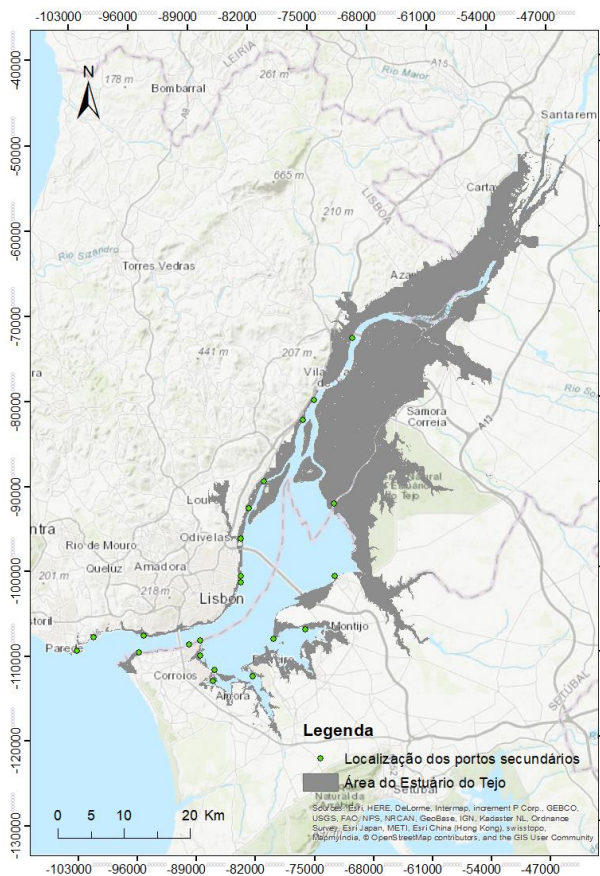
As cotas extraídas para cada cenário e cada marégrafo correspondem a curvas de percentil projectadas para 0.1% e fornecidas por Carlos Antunes (IDL) no âmbito de estudos do impacto da subida do NMM. Um nível extremo que se verifica apenas a 0.1% do número total de horas num ano (8760 horas), ou seja, verifica-se apenas durante 9 horas num ano, correspondentes aos períodos de marés-vivas equinociais que ocorrem em Fevereiro-Março e Setembro-Outubro.

Com o objectivo de tornar a cartografia de inundação mais precisa em cada local, foi criada uma superfície que pretende revelar o comportamento da superfície da água ao longo do Estuário do Tejo e da Ria de Aveiro. Para o efeito determinaram-se neste estudo as concordâncias de maré, tal como se apresentam no *Estudo do Litoral na zona ARH do Tejo*, na secção de caracterização de marés (APA *et al.*, 2013), que constituem um conjunto de parâmetros de desfasamento de onda de maré entre dois portos que apresentam o mesmo regime de maré, habitualmente entre um porto principal e um porto secundário existente nas imediações. O sistema das concordâncias assenta na aplicação das diferenças horárias das marés e nas diferenças de altura ou relações de amplitude.

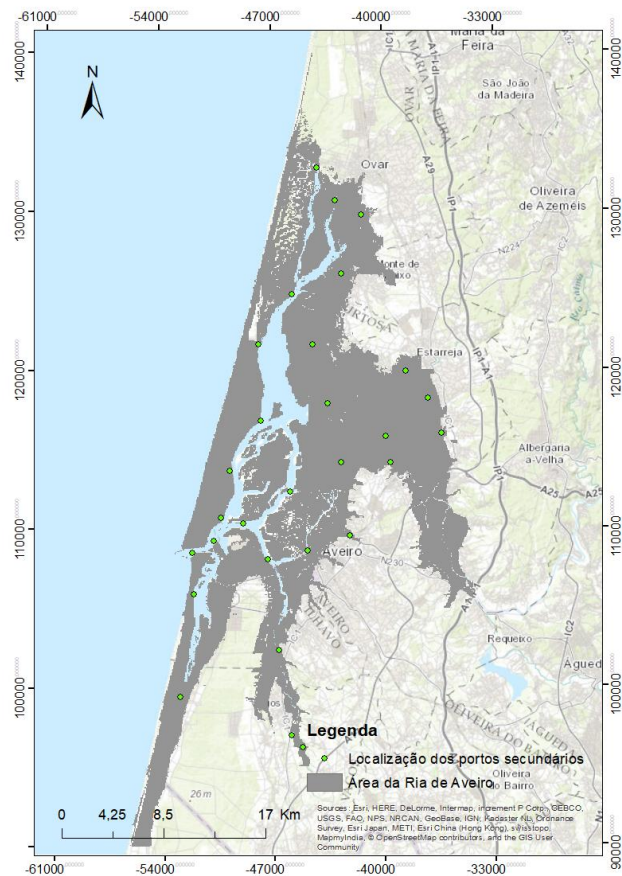
Como referido anteriormente os valores de concordâncias foram obtidos da Tabela de Maré do IH de 2017 (Figura 3.10) e completada com dados de projectos anteriores da FCUL. Esta tabela tem para cada porto secundário, as coordenadas geográficas no *Datum* WGS84 do mesmo e as correcções em tempo e altura. Na Figura 3.11 é possível ver a localização dos portos secundários ao longo da Ria de Aveiro e do Estuário do Tejo.

NOME DO PORTO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (WGS84)		NÍVEL MÉDIO	CORREÇÕES EM TEMPO				CORREÇÕES EM ALTURA				RELAÇÃO DE AMPLITUDE	
	Lat (N)	Long (W)		PM.		BM.		PM.		BM.		AM.	AV.
				AM. h min	AV. h min	AM. h min	AV. h min	AM. m	AV. m	AM. m	AV. m		
LISBOA (Págs. 2-53 a 2-70)	38 42.62	9 07.53	2.20					2.96	3.75	1.44	0.65		
Papo de Arcos	38 41.5	9 17.6	2.08	-0 23	-0 31	-0 13	-0 20	-0.24	-0.33	0	+0.05	0.85	0.88
Pedrouços	38 41.6	9 13.5	2.10	-0 18	-0 21	-0 16	-0 21	-0.17	-0.22	0	0	0.91	0.93
Trafaria	38 40.5	9 13.9	2.10	-0 12	-0 18	-0 09	-0 13	-0.19	-0.26	0	0	0.88	0.92
Cacilhas	38 41.3	9 08.9	2.20	-0 11	-0 11	-0 14	-0 17	0	0	0	0	0.97	1.00
Arsenal do Alfeite	38 40.3	9 08.9	2.20	-0 06	-0 06	-0 05	-0 05	+0.02	+0.02	+0.02	+0.02	1.01	0.99
Montijo	38 41.4	9 02.9	2.25	-0 03	-0 06	-0 13	-0 17	+0.06	+0.11	0	-0.07	1.02	1.06
Seixal	38 39.0	9 04.6	2.25	0	-0 05	-0 11	-0 15	0	+0.07	+0.06	0	0.98	1.02
Cais da Matinha	38 45.0	9 05.6	2.25	+0 05	+0 05	-0 02	+0 01	+0.20	+0.20	+0.05	0	-	-
Cabo Ruivo	38 45.4	9 05.5	2.25	0	0	-0 11	-0 14	+0.08	+0.15	0	-0.11	1.05	1.08
Alcochete	38 45.4	8 57.9	2.30	+0 10	+0 10	0	0	+0.20	+0.30	-0.10	-0.20	1.10	1.13
Ponta da Erva	38 50.0	8 58.0	2.35	+0 09	+0 11	+0 02	+0 11	+0.25	+0.34	0	-0.13	1.14	1.15
VALORSUL	38 49.7	9 04.9	2.30	+0 14	+0 17	+0 05	+0 15	0	+0.10	-0.25	-0.30	-	-
Póvoa de Santa Iria	38 51.4	9 03.7	2.30	+0 10	+0 17	+0 02	+0 13	+0.20	+0.18	0	0	1.15	1.07
CIMPOR	38 55.3	9 00.5	2.35	+0 25	+0 35	+0 40	+1 20	+0.30	+0.30	0	+0.30	-	-
Vila Franca de Xira	38 56.6	8 59.6	2.40	+0 35	+0 40	+0 50	+1 30	+0.25	+0.30	0	+0.40	1.14	1.02
Carregado – terra	39 00.5	8 56.5	2.40	+1 07	+1 18	+1 30	+2 05	+0.28	0	+0.15	+0.48	1.08	0.84

Figura 3.10 Excerto da Tabela de Maré o Instituto Hidrográfico de 2017 com as concordâncias observadas em relação ao Porto de Lisboa



(a)



(b)

Figura 3.11 Localização dos portos secundários utilizados para (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro

A partir destes dados foi construída uma tabela com a informação da localização de cada porto e a respectiva correcção em altura numa preia-mar de águas-vivas. Em *ArcMap*, estes pontos deram origem a uma camada de informação pontual (numa estrutura *shapefile*), a qual foi então projectada e transformada para o sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89 e a partir dos pontos obtidos foram gerados ficheiros *raster* usando um interpolador. Uma vez em ambiente SIG, esta camada de pontos foi usada para se proceder à espacialização dos valores das concordâncias nas áreas de estudo, usando os valores correspondentes nos pontos e um método de interpolação adequado. O interpolador usado para a produção da superfície de concordâncias foi o *Kriging*, com um modelo esférico para o ajuste, sendo este procedimento efectuado também no *software* ArcMap.

Para validar a precisão da interpolação foi utilizado o método *Cross Validation*, disponível na *toolbox Geostatistical* do ArcGIS, e que não é mais do que a técnica para estimar o desempenho de um modelo preditivo (Robinson e Metternich, 2006 citando Davis, 1987).

Os parâmetros avaliados foram a Média dos Erros (ME) e o Erro Médio Quadrático estandardizado (EMQ). A ME deve estar próxima de zero para o método de interpolação ser considerado não tendencioso e o EMQ deve ser igual a 1, caso contrário estaremos perante uma interpolação subestimada ($EMQ < 1$) ou sobrestimada ($EMQ > 1$) (Robinson e Metternicht, 2006).

A superfície interpolada para o Estuário do Tejo apresenta uma ME igual a 0.015 m e um EMQ de 0.97 m, estando, portanto, dentro dos valores admitidos para considerar esta uma interpolação adequada. No caso da Ria de Aveiro a ME é de -0.03 m e o EMQ de 1.13 m. Estes valores foram também considerados aceitáveis para a validação desta superfície.

3.2.2.3 Características Físicas

I Geologia

A informação relativa a este parâmetro foi retirada da carta geológica na escala de 1:50 000. Esta carta encontra-se disponível pela (DGT) através de um serviço *web* (serviço WMS). No *software* ArcMap é possível visualizar esta informação em formato *raster*, não editável, e a partir dela, recorrendo às funcionalidades de edição deste programa, fazer a digitalização das diferentes unidades geológicas. O resultado foi uma caracterização simplificada das litologias presentes em cada região, em formato *shapefile* do tipo polígono. Esta informação foi transformada em formato *raster* e reclassificada em 5 classes Tabela 3.3, de acordo com a consolidação dos sedimentos e a dureza da rocha.

Tabela 3.3 Classificação do critério Geologia quanto à sua vulnerabilidade física

1	2	3	4	5
Complexo Vulcânico de Lisboa	Calcários e margas de diferentes formações	Areias e argilas sobreconsolidadas	Areias e argilas/ Areias de praia / Dunas	Aluviões e/ou aterros

Nas Figura 3.12 e Figura 3.13 é possível ver o produto após a digitalização e o produto final após a reclassificação da informação:

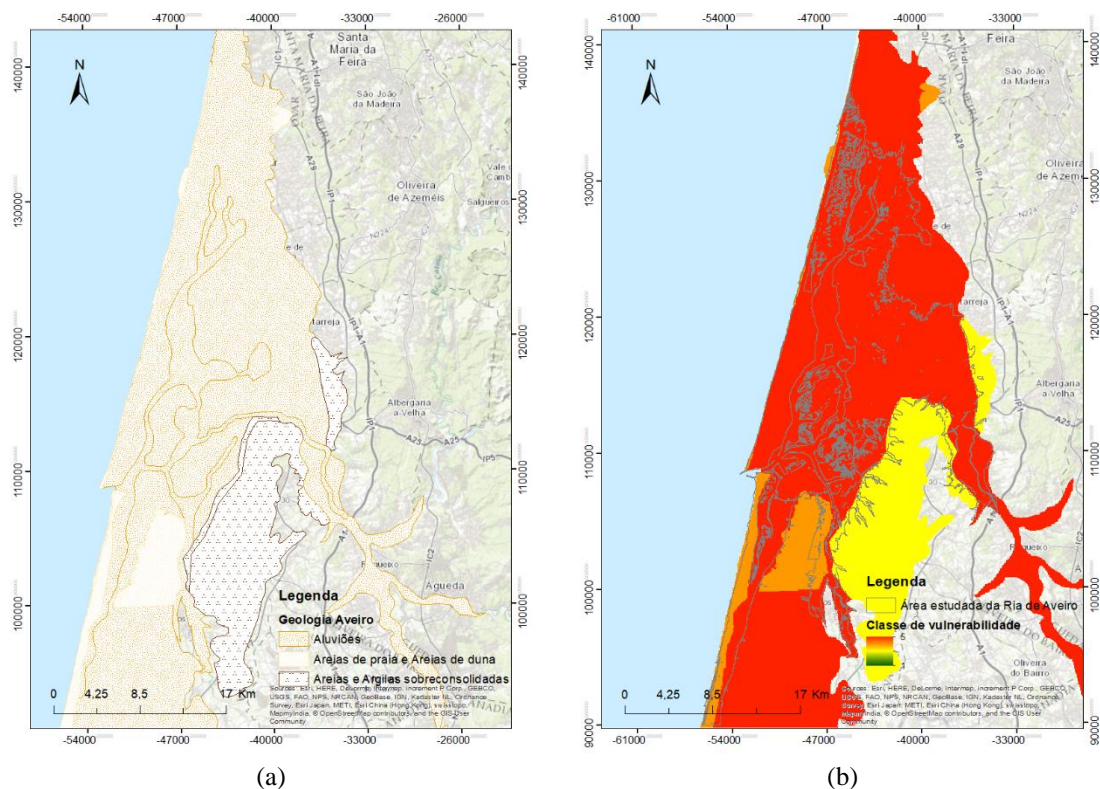


Figura 3.12 (a) Carta geológica simplificada, adaptada da cartografia geológica à escala 1:50000 da Ria de Aveiro e (b) Reclassificação em classes do critério Geologia quanto à sua vulnerabilidade à sNMM

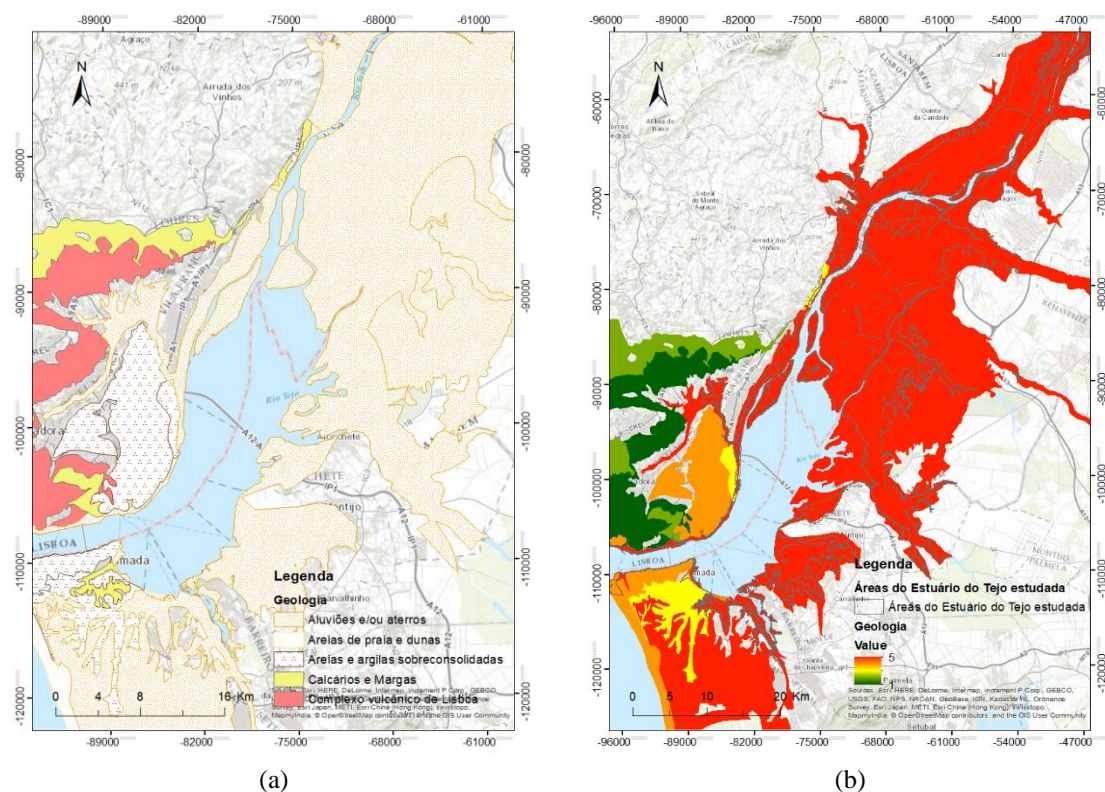


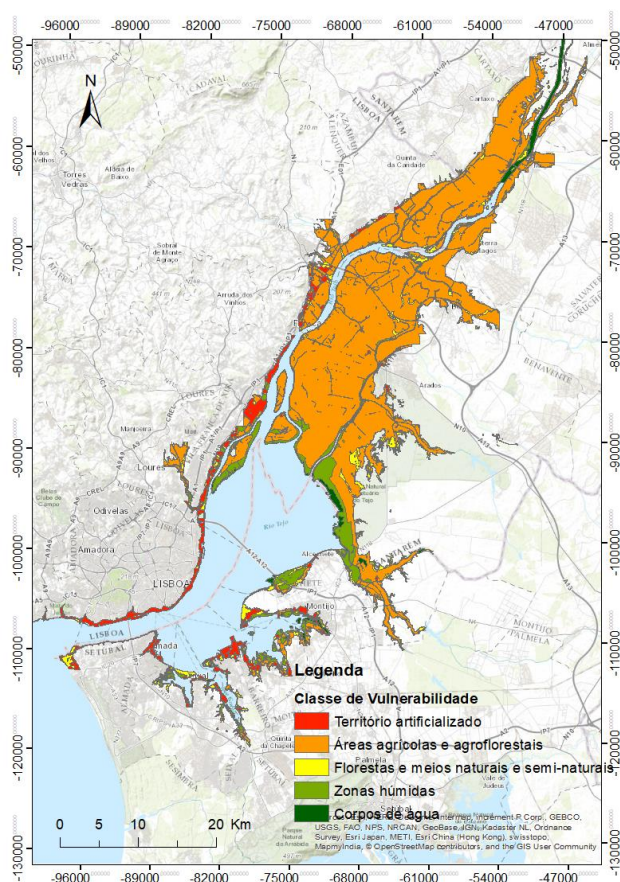
Figura 3.13 (a) Carta geológica simplificada, adaptada da cartografia geológica à escala 1:50000 do Estuário do Tejo e (b) Reclassificação em classes do critério Geologia quanto à sua vulnerabilidade à sNMM

II Ocupação do Solo

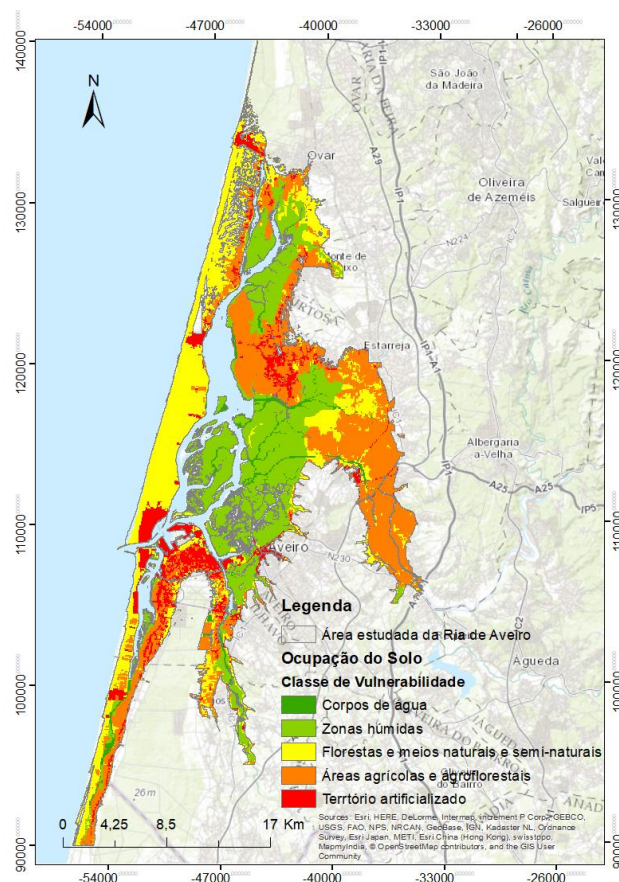
A ocupação do solo foi recolhida da Carta de Ocupação de Uso do Solo de 2010 (COS2010), disponível para download pela (DGT), no sistema de referência ETRS89/PT-TM06, realizada a partir de imagens aéreas ortorrectificadas de 2010. Esta carta encontra-se organizada numa hierarquia de cinco níveis de detalhe e 193 classes no 5º nível. A informação recolhida foi agrupada pelo nível 1 de detalhe, transformada em formato *raster* e reclassificada em 5 classes (Tabela 3.4):

Tabela 3.4 Classificação do critério Ocupação do Solo quanto à sua vulnerabilidade física

1	2	3	4	5
Corpos de água	Zonas húmidas	Florestas e meios naturais e semi-naturais	Áreas agrícolas e agro-florestais	Territórios artificializados



(a)



(b)

Figura 3.14 Cartografia simplificada da ocupação do solo no (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro, adaptada da COS 2010

III Distância à MPMAVE

A demarcação da LMPMAVE (Linha Máxima de PM de AV Equinociais) não é directa nem simples de efectuar. Segundo Rilo *et al.* (2014), a Administração da Região Hidrográfica (ARH) do Algarve e a ARH Centro concordam que a demarcação desta linha no caso dos Estuários e lagunas permanentes deve ser feita caso a caso, combinando informação altimétrica, a cartografia das biocenoses das plantas halófitas presentes, e a informação recolhida no terreno durante as marés de águas-vivas equinociais. Dada a sua especificidade não foi possível encontrar disponível informação sobre esta linha de MPMAVE, pelo que se recorreu à sua definição.

A linha resultante do procedimento seguido nesta dissertação pretende ser apenas uma aproximação a esta linha e não um substituto da mesma e resulta da intersecção do plano de água com a superfície do território.

Os valores para a produção desta superfície foram obtidos a partir do valor médio das máximas preia-mar resultantes de análise harmónica dos dados dos marégrafos utilizados para a Ria de Aveiro e o Estuário do Tejo para a época de 2011 – 2020, fornecidos por Carlos Antunes do IDL no âmbito dos estudos em curso acerca dos impactos da subida do nível médio do mar, ou seja, apenas o NMM é considerado e não a SM ou agitação, sendo por isso pertinente a utilização deste parâmetro na avaliação. Regiões mais próximas desta linha estarão mais sujeitas a inundação por fenómenos que aumentem a altura da água.

Em ambiente ArcMap foi criado um *raster* de valor constante correspondente à média das máximas preia-mar para o período referido. A este *raster* foi adicionada a superfície de maré interpolada, com o intuito de projectar este valor para todo o Estuário e Ria, resultando numa superfície que tenta ilustrar a máxima maré de águas-vivas equinociais para toda a área. Os pixels com probabilidade de pertencerem a esta linha foram obtidos a partir de uma série de cálculos em *Raster Calculator*. Com esta informação e a observação directa de imagens de satélite, referentes ao ano de 2015 e disponibilizadas pela ESRI® por meio do *basemap* do ARCGIS foi digitalizada manualmente a MPMAVE (Figura 3.15).

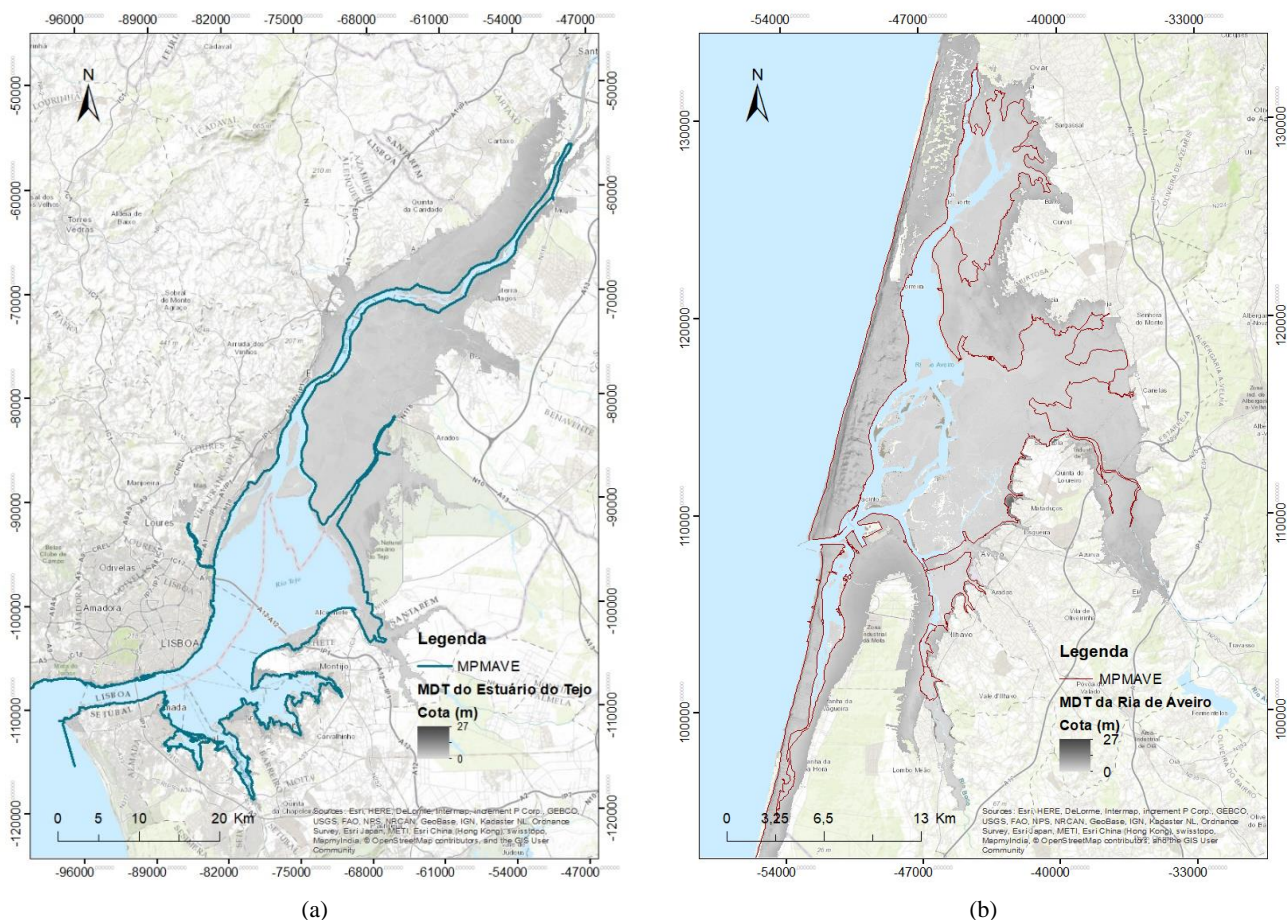


Figura 3.15 Linhas MPMAVE para (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro

IV Caudal fluvial

A dificuldade em aliar cotas altimétricas a caudais fluviais (Rilo *et al.*, 2014), impossibilitou a inclusão deste parâmetro com valores concretos em cada local. Este critério foi introduzido na avaliação da vulnerabilidade física através de classes de influencia do caudal, classificando cada zona desde muito afectada por uma máxima descarga fluvial (classe 5), ou nada afectada pela descarga fluvial (classe 1) (Tabela 3.4). Foi criada uma superfície que procura recriar a influencia de uma descarga fluvial ao longo do Estuário do tejo, através da produção de um plano de tendência que neste trabalho foi produzido de forma simples pela ferramenta *Trend Surface* do *ArcMap* (Figura 3.16).

Tabela 3.5 Classificação do critério Caudal Fluvial para o Estuário do Tejo

1	2	3	4	5
Não afectada		Medianamente afectada		Extremamente afectada

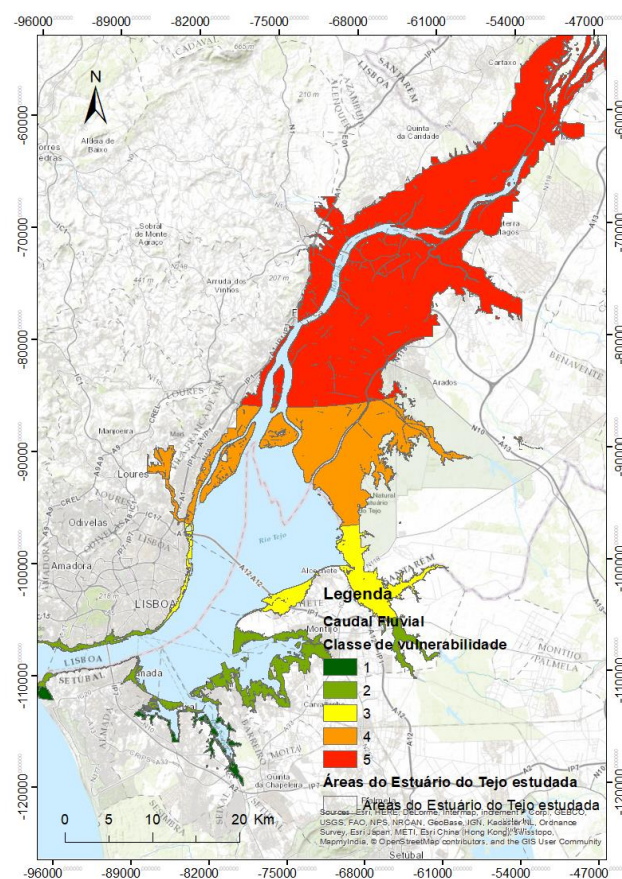


Figura 3.16 Reclassificação do caudal fluvial em 5 classes de vulnerabilidade à sNMM

3.2.2.4 Factores sociais e económicos

I Densidade Populacional

A informação referente à população residente foi obtida a partir dos dados do INE (Instituto Nacional de Estatística), que disponibiliza o total de indivíduos residentes por unidade estatística usadas nos censos BGRI. Esta informação permitiu o calculo da densidade populacional, ou seja, habitantes por km², em ambiente *ArcMap*. Neste *software*, através da ferramenta *Calculate Geometry* foi possível determinar a área de cada BGRI, de seguida passou-se ao calcula da densidade populacional a partir da formula:

$$Densidade\ populacional = \frac{Número\ de\ habitantes}{Área\ da\ BGRI\ (km^2)} \quad (3.4)$$

As classes em que foi reclassificado este critério variam de densidade muito elevada (> 6000 hab/km²) a densidade populacional muito baixa (< 500 hab/km²) (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 Classificação do critério Densidade Populacional

1	2	3	4	5
<500	500-1000	1000-3000	3000-6000	>6000

II Percentagem de área urbanizada/industrializada

A área urbanizada inclui a porção do terreno artificializado ligado directamente às comunidades, ou seja, áreas de habitação, estruturas de indústria e comércio, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, zonas históricas e vias de comunicação como redes viárias e ferroviárias. A percentagem de área urbanizada/ industrializada foi retirada do nível 2 da COS de 2010, disponibilizada pela DGT. Para obter esta informação, foram reunidos os índices 1.1, 1.2 e 1.4. Esta informação foi dividida em 5 classes, tendo em conta a percentagem de área urbanizada em cada BGRI, obtida como indicado na Figura 3.17.

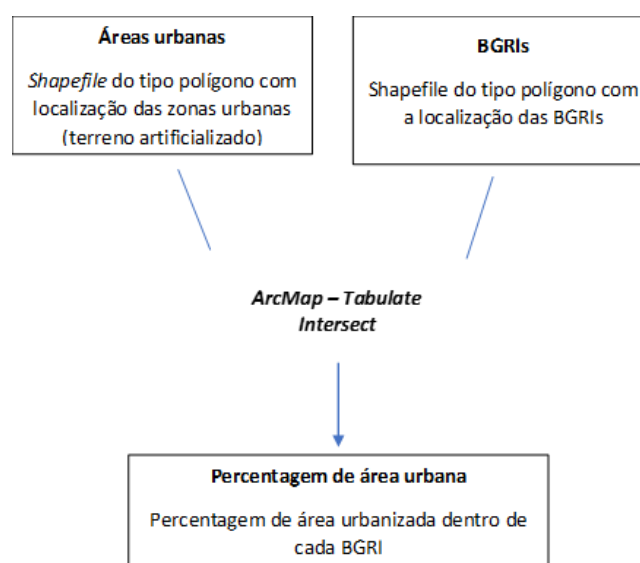


Figura 3.17 Cálculo da percentagem de área urbanizada/ industrializada em cada BGRI

As classes encontram-se em percentagem e caracterizam cada localidade desde extremamente vulnerável (>60%) a muito pouco vulnerável (<10%) (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 Classificação do critério Percentagem de Área Urbanizada

1	2	3	4	5
<10	10-20	20-40	40-60	>60

II.1 Percentagem de área ecológica

As zonas de interesse ecológico albergam ecossistemas de interesse para as populações, economia e outros sectores como a ciência, gerando benefícios que incluem a nutrição, o acesso a água de qualidade, ar limpo, saúde e recreação, entre outros, como refere o ICNF na nota explicativa sobre as ZPE e SIC.

A área com valor ecológico de Portugal Continental encontra-se disponibilizada pelo ICNF (Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas), para o ano de 2017 e foi calculada para cada BGRI através da ferramenta *Tabulate Intersect* (Figura 3.18).

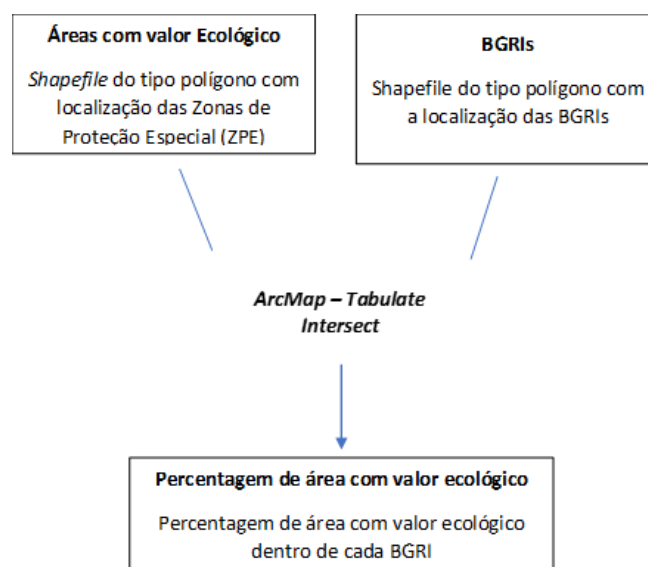


Figura 3.18 Cálculo da percentagem de área com valor ecológico em cada BGRI

Este critério, à semelhança dos anteriores foi dividido em 5 classes, que caracteriza a percentagem área de valor ecológico em cada BGRI.

Tabela 3.8 Classificação do critério Percentagem de Área com Valor Ecológico

1	2	3	4	5
<5	5-20	20-30	30-60	>60

3.3 Cartografia de Inundação

A cartografia de inundação foi realizada para os anos de 2050 e 2100, para os dois modelos de maré e para as duas regiões de estudo. Foram produzidos um total de 4 mapas para cada região com as designações B3a, B4b, C3a e C4b, referentes a cada cenário:

- B3a – projecção do NMM para 2050, com maré e período de retorno de SM de 50 anos
- B4b – projecção do NMM para 2050, com maré e período de retorno de SM a 100 anos e SetUP de ondas e vento
- C3a – projecção do NMM para 2100, com maré e período de retorno a 50 anos
- C4b - projecção do NMM para 2100, com maré e período de retorno de SM a 100 anos e SetUP de ondas e vento

Esta informação caracteriza um local quanto à probabilidade de este inundar, dado um determinado cenário. Por forma a classificar a probabilidade da inundação, foi calculado um índice, de 1 a 5, sendo 1 a menor probabilidade de inundar e 5 a maior. Aplicando a metodologia aplicada por Rocha (2016), resultante da adaptação do proposto por Marcy *et al.* (2011), a probabilidade de inundação de um dado local é calculada com base na estimativa do desvio padrão dos níveis máximos de maré, da subida do NMM e da SM, do MDT e da superfície de maré interpolada. O desvio padrão referente à maré inclui o erro para a previsão da maré e para a superfície de maré interpolada (Fórmula 3.6).

$$\sigma_{cenário} = \sqrt{\sigma_{Maré}^2 + \sigma_{NMM}^2 + \sigma_{SM}^2 + \sigma_{MDT}^2} \quad (3.5)$$

A incerteza dos parâmetros referentes à subida do NMM e à SM irá depender de cada cenário, do ano de projecção e do MDT utilizado (Tabela 3.9)

Tabela 3.9 Incertezas associadas a cada parâmetro para as duas projecções em estudo (2050 e 2100) e os dois locais de estudo (cm)

	Ria de Aveiro				Estuário do Tejo			
Ano de projecção	$\sigma_{Maré}$	σ_{NMM}	σ_{SM}	σ_{MDT}	$\sigma_{Maré}$	σ_{NMM}	σ_{SM}	σ_{MDT}
2050	6	7	9	44	6	7	9	34
2100	6	36	15	44	6	36	15	34

A partir da distribuição normal resultante da incerteza (Figura 3.19), foram calculadas as classes de probabilidade de inundação e determinadas as cotas mínima e máxima para cada classe de probabilidade e cada cenário (Tabela 3.10). O método de cálculo da referida tabela foi fornecido por Carlos Antunes do IDL/FCUL no âmbito do estudo do impacto da subida do NMM.

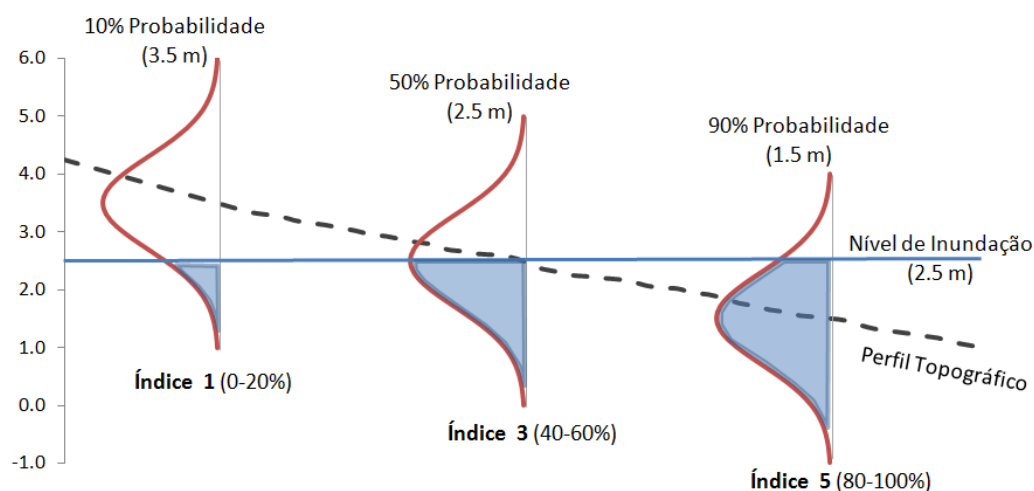


Figura 3.19 Método de determinação da probabilidade de inundação de um dado local (1.5 m, 2.5 m e 3.5 m de cota) e respetivo índice de perigosidade, relativamente ao máximo de maré sobrelevada (nível de inundação de $h=2.5$ m) e baseado na incerteza dos respetivos parâmetros (Extraído de Antunes et al. (2017))

Tabela 3.10 Cotas mínima e máxima para cada classe de probabilidade de inundação, para o cenário B3a para o ano de 2050

		B3a 2050	
Classe vulnerabilidade		Min.	Máx.
1	0-20 %	3.40	4.15
2	20-40 %	3.05	3.40
3	40-60 %	2.80	3.05
4	60-80 %	2.45	2.80
5	80-100 %	-	2.45

Para melhor entendimento do processamento que resultou nos mapas de inundação finais, este será explicado para o exemplo da classe 1 de vulnerabilidade de um qualquer cenário. Na Figura 3.20 é apresentado um resumo de todos os passos e apresentadas as ferramentas utilizadas usando um *workflow* para o efeito.

Em ambiente *Arcmap*, o primeiro passo foi a criação de dois ficheiros numa estrutura *raster* com valor constante, correspondentes à cota máxima e mínima da classe de menor probabilidade. A cada ficheiro *raster* foi adicionada a superfície de maré interpolada. De seguida, através da aplicação de uma condição, foram seleccionados os valores do MDT que se encontravam acima da cota mínima e abaixo da cota máxima. Os valores comuns a estas duas superfícies foram também seleccionados a partir de uma condição, resultando no intervalo de cotas que estavam incluídas na classe 1 de vulnerabilidade, correspondente a uma probabilidade de inundação entre os 0 e os 20%.

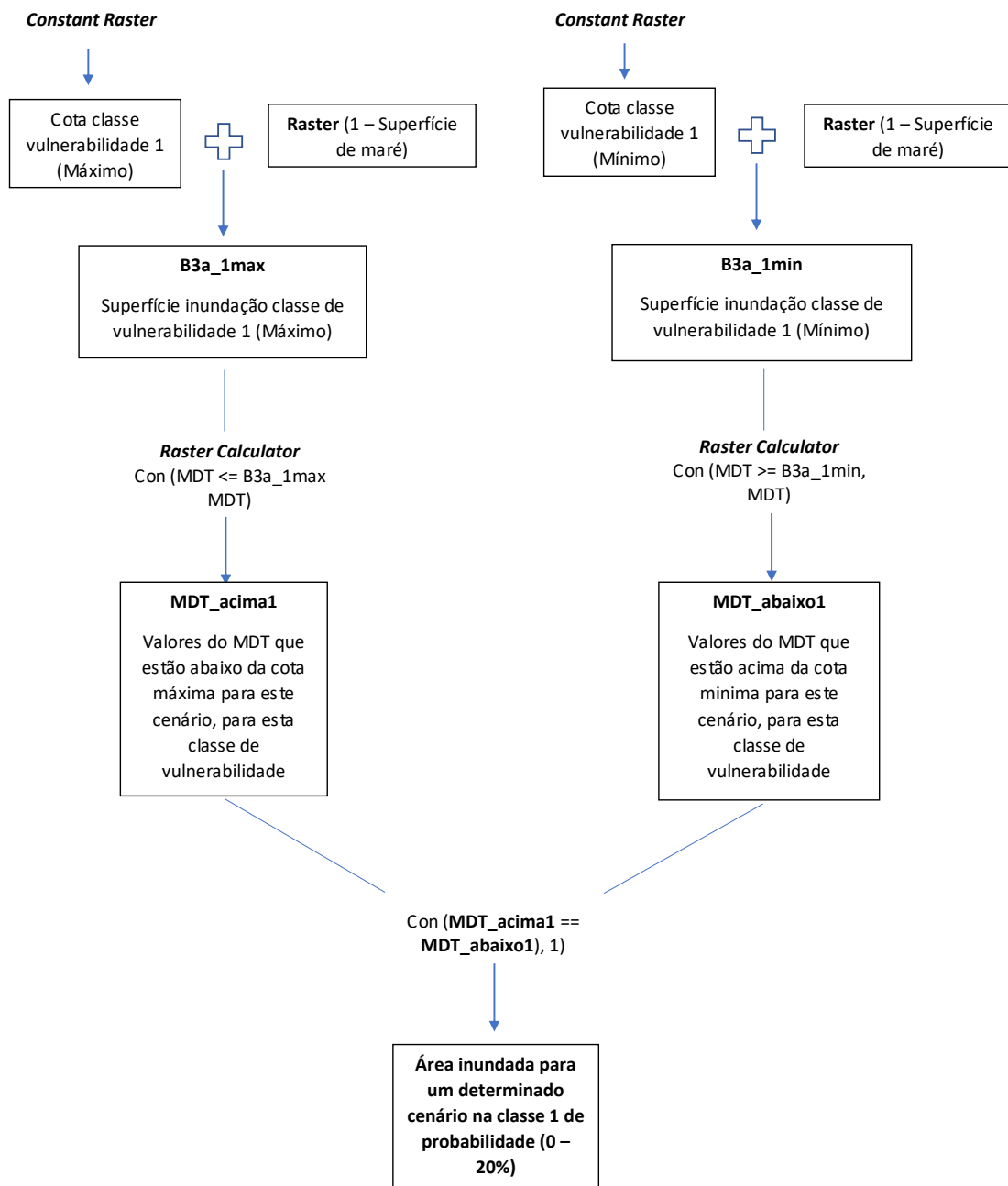


Figura 3.20 Esquema do processamento utilizado para a produção da cartografia de inundação, em ambiente ArcMap para o caso da classe 1 de vulnerabilidade

3.3.1 Resultados

De acordo com as projecções descritas para o cenário menos gravoso (B3a) (Figura 3.21), as freguesias do Estuário do Tejo mais afectadas pela inundação com uma probabilidade entre os 40 e os 100% são Samora Correia, Alcochete, a União das freguesias de Camarate, Unhos e Apelação, Corroios, Vila Franca de Xira e a União das freguesias de Santo António dos Cavaleiros e Frielas, que têm no total entre 75 a 98% das suas áreas potencialmente inundadas. A área que inundará com uma probabilidade entre os 80 e 100% é de 259 km² de um total de 415.5 km². Para o cenário em que é adicionado o *setup* de ondas e vento verifica-se um ligeiro aumento no total de área inundável com grande probabilidade, passando de 62.3% para 70.5% (Figura 3.21).

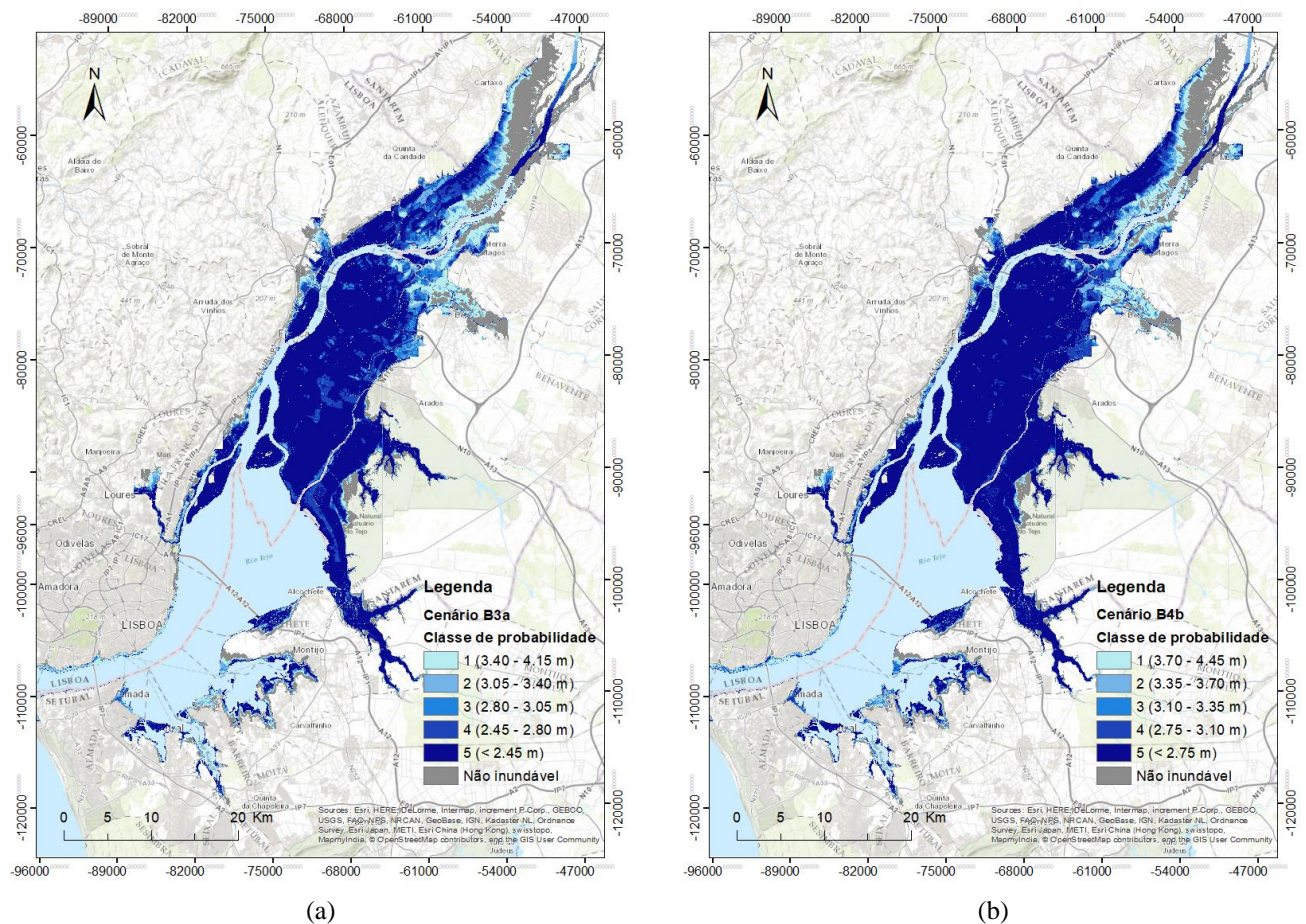


Figura 3.21 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para o Estuário do Tejo. (Alturas de inundação referentes ao Porto de Lisboa)

Tabela 3.11 Área inundada, em km², pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2050 para o Estuário do Tejo

	Inundação B3a		Inundação B4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	50.3	12.1	40.8	9.6
2	29.2	7.0	26.9	6.3
3	27.7	6.7	20.1	4.7
4	49.4	11.9	37.7	8.9
5	259.0	62.3	300.0	70.5
Total	415.5	100	425.5	100

Como seria de esperar, para o ano de 2100 as projecções apontam para uma maior área afectada pela inundação, provocada pela subida do nível médio do mar.

No Estuário do Tejo prevê-se um total de 71% da área inundável com uma probabilidade entre 80% e 100%, quase certa, segundo os modelos aqui aplicados, para o cenário C3a, o que corresponde a uma afectação de 64 freguesias no total (Figura 3.22).

Em 2100, segundo este modelo de inundação, pode ainda prever-se que a inundação afectará em estruturas importantes para o país, tais como a base Naval do Alfeite e a base Aérea do Montijo que passam a ter a sua estrutura, maioritariamente, classificada com uma probabilidade de inundação entre 80 e 100%.

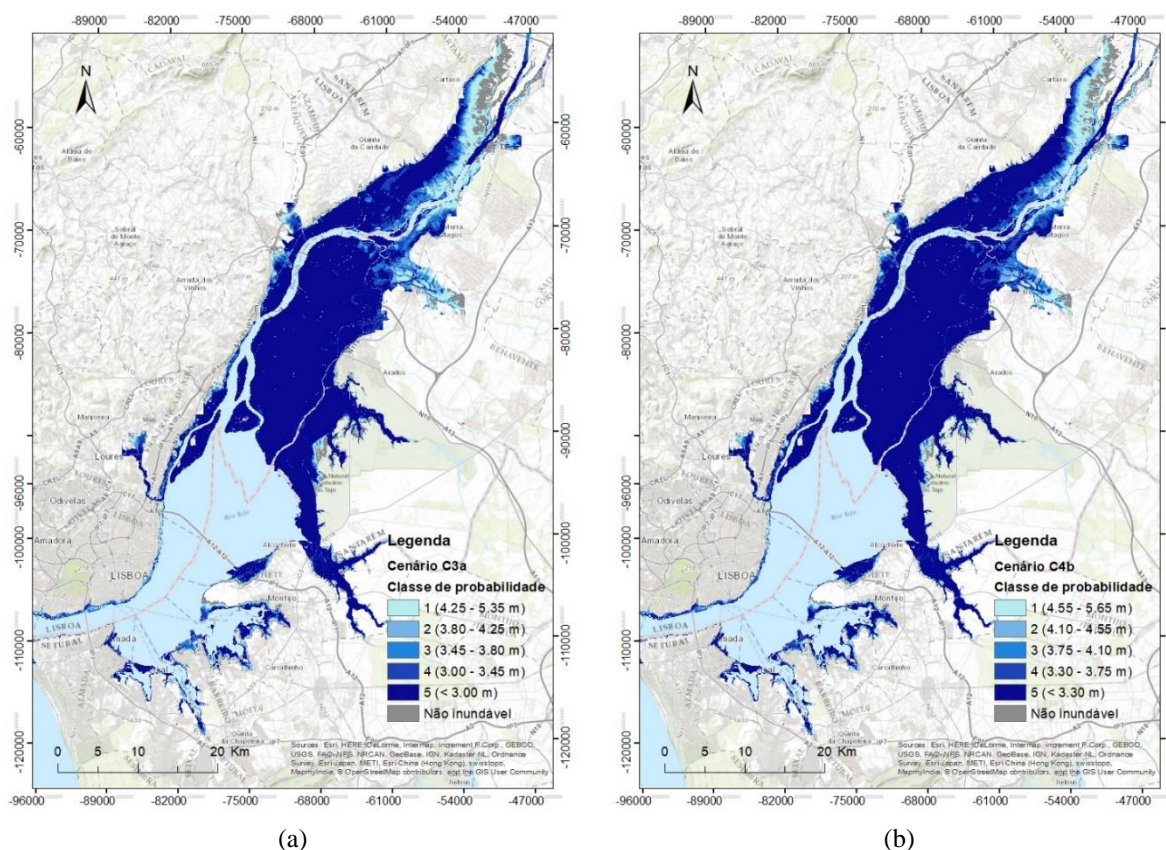


Figura 3.22 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para o Estuário do Tejo. (Alturas de inundação referentes ao Porto de Lisboa)

O concelho de Lisboa, com importância óbvia, também aumenta a sua probabilidade de inundar face ao cenário de 2050, com aproximadamente 35% da sua zona ribeirinha com probabilidade de inundar entre 60 e 100%. Na zona mais a montante, no concelho de Vila Franca de Xira e início do Concelho de Loures existem também importantes aglomerados habitacionais e industriais, localizados na zona ribeirinha destes concelhos o que os coloca numa posição extremamente vulnerável (Figura 3.23).

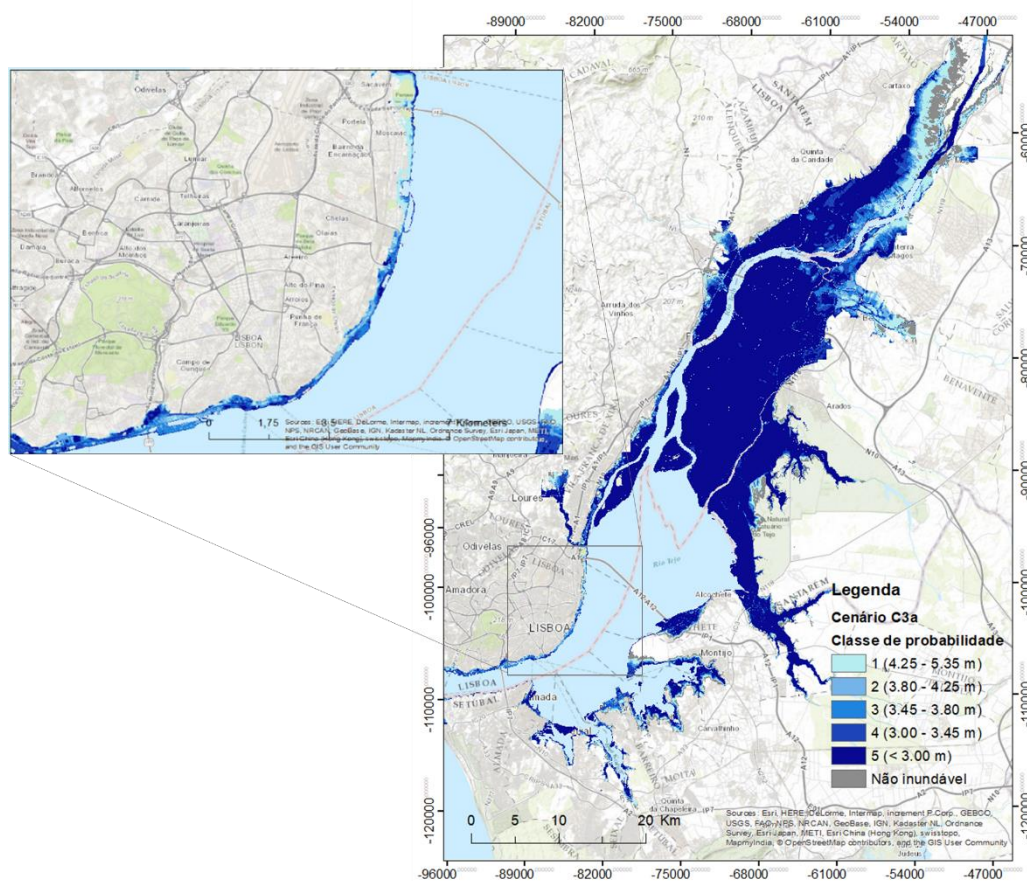
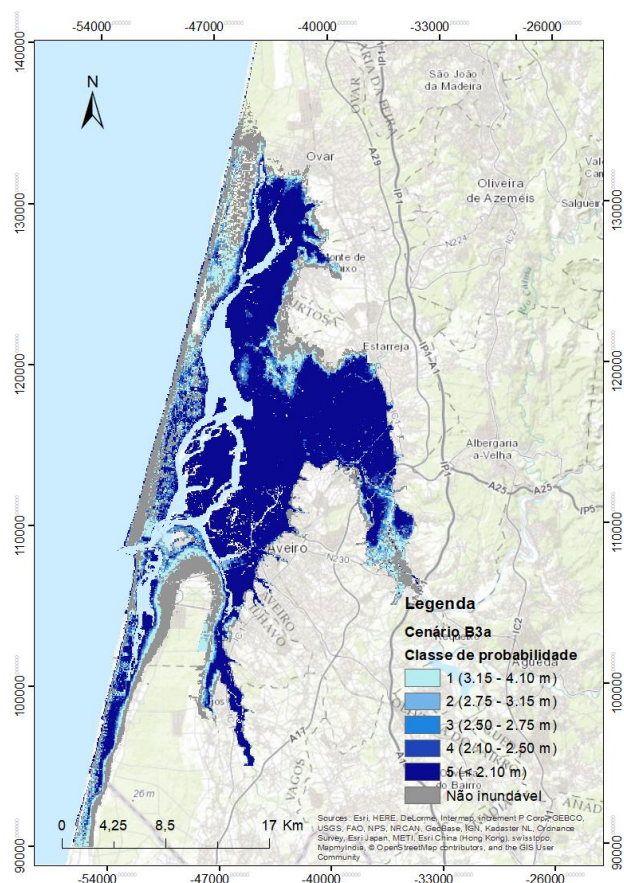


Figura 3.23 Pormenor da área com probabilidade de inundar no concelho de Lisboa. (Alturas de inundação referentes ao Porto de Lisboa)

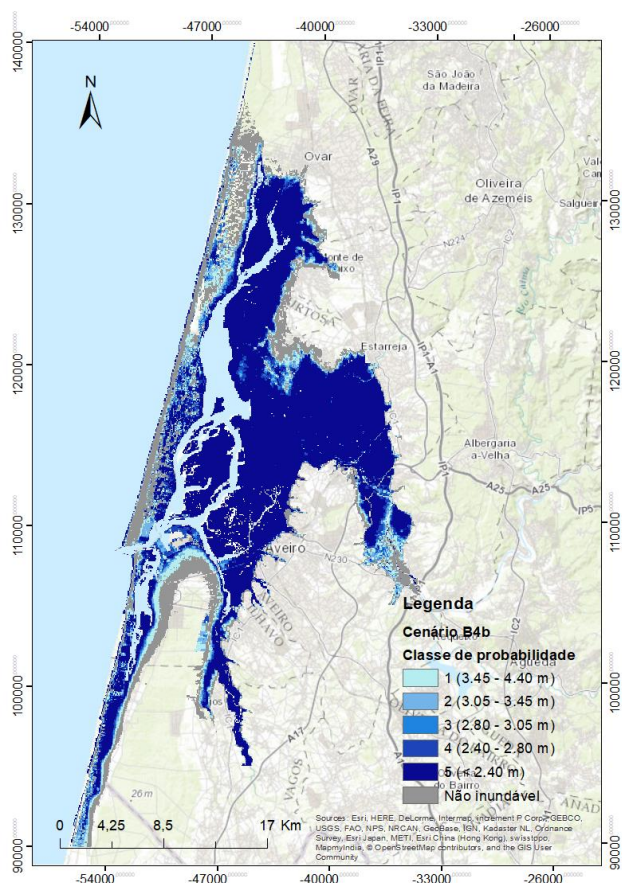
No caso da Ria de Aveiro, e começando pelo horizonte temporal mais próximo, o de 2050, as freguesias mais afectadas, com um total de área inundável superior a 80%, inserido nas classes 3, 4 e 5 de probabilidade (superior a 60%), serão as de Bunheiro, Ouca, Santo André e Vagos, Murtosa, Angeja, Cacia, Salreu e União das freguesias de Glória e Vera Cruz (Figura 3.24). A Ria de Aveiro tem, para o cenário B3a, um total de 77.2% de área inundável com uma probabilidade superior a 60% e, para o cenário B4b, um total de 80.4% (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 Área inundada, em km², pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2050 para a Ria de Aveiro

	Inundação B3a		Inundação B4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	28.1	13.8	20.9	9.8
2	11.5	5.6	12.9	6.0
3	6.9	3.4	8.0	3.8
4	12.2	6.0	13.9	6.5
5	145.5	71.2	157.9	73.9
Total	204.3	100	213.7	100



(a)



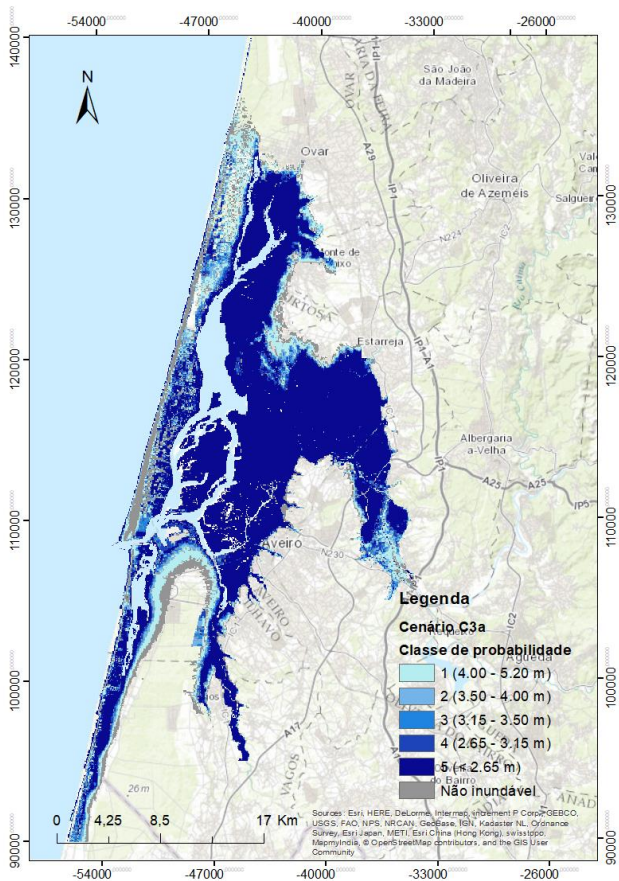
(b)

Figura 3.24 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para a Ria de Aveiro. (Alturas de inundação referentes à Barra de Aveiro)

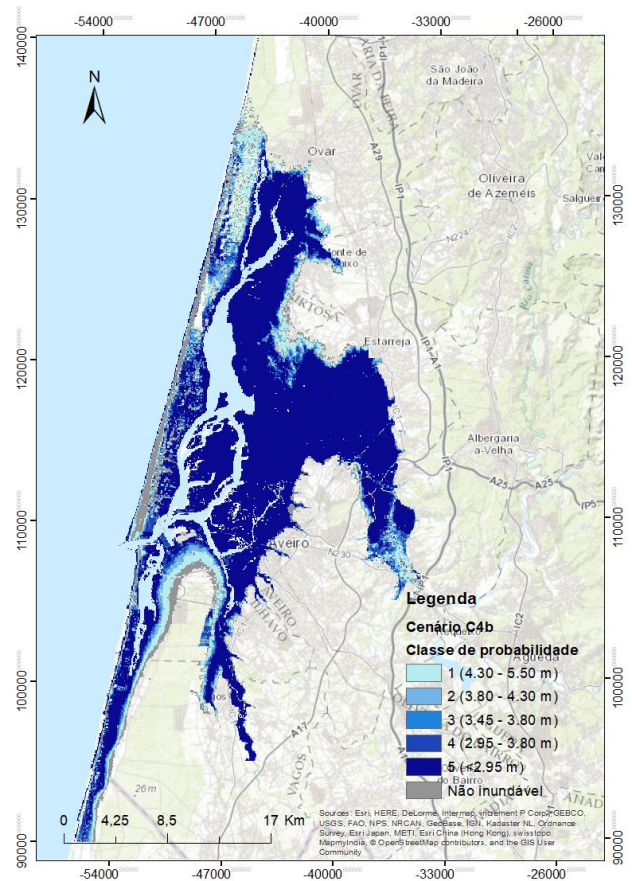
Para o cenário de 2100, na Ria de Aveiro o aumento da área inundável com maior probabilidade, pertencente à classe 5 não é tão marcada como no caso do Estuário do Tejo, mas observa-se um aumento significativo das áreas pertencentes às classes 3 e 4. É de notar também um aumento da área total inundável para o cenário mais gravoso (C4b), com o aumento de 213.7 km² no cenário de 2050, para 236.1 km² nas projecções para 2100.

Tabela 3.13 Área inundada, em km², pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2100 para a Ria de Aveiro

	Inundação C3a		Inundação C4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	8.9	4.4	8.9	4.2
2	23.7	11.8	21.9	10.4
3	20.5	10.2	20.1	9.5
4	26.5	13.1	27.3	12.9
5	149.7	74.1	157.8	74.7
Total	229.4	100	236.1	100



(a)



(b)

Figura 3.25 Distribuição das classes de probabilidade de inundação para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para a Ria de Aveiro. (Alturas de inundação referentes à Barra de Aveiro)

3.4 Cartografia de Vulnerabilidade

A subida do NMM pode causar: inundações, movimentos verticais de regiões de baixa altitude, erosão e degradação da linha de costa, aumento da inundação costeira e a salinização de estuários e aquíferos de água doce (Doukakis, 2005). O principal impacto em estuários e lagoas costeiras será a sua inundação, mas também o desenvolvimento de uma tendência para movimentos verticais, resposta natural destes sistemas à subida do NMM (Taborda e Ribeiro, 2015), o que irá aumentar o risco de inundação para áreas adjacentes e provocar a migração destes sistemas.

A vulnerabilidade à inundação nesta dissertação foi calculada para os cenários e inundação propostos, para os dois horizontes temporais, resultando num total de 4 mapas finais. A metodologia aplicada para esta apreciação consiste numa variante do método CVI, proposto inicialmente por Gornitz *et al.* (1991), com múltiplas aplicações e adaptações, descritas no capítulo da revisão bibliográfica. Pretende-se nesta dissertação aplicar este método, de fácil implementação, e perceber qual será a sua aplicabilidade à escala local e em sistemas deste tipo (Estuários). De seguida será feita uma descrição dos critérios utilizados e dos métodos experimentados para a sua ponderação.

A cartografia de vulnerabilidade resulta da combinação do índice CVI e da probabilidade de inundação, feita através da multiplicação da cartografia de inundação com o resultado do índice (Fórmula 3.7). A reclassificação do índice CVI é feita através de um arredondamento dos valores obtidos, como demonstrado na Tabela 3.14.

$$V = \text{Probabilidade de inundação} * CVI \quad (3.6)$$

Tabela 3.14 Índice CVI após reclassificação dos resultados obtidos

1	2	3	4	5
1 – 1.5	1.5 – 2.5	2.5 – 3.5	3.5 – 4.5	4.5 - 5

Os mapas finais apresentados dividem-se em 5 classes, de 1 a 5, em que 1 representa uma vulnerabilidade muito baixa e 5 uma vulnerabilidade extrema. As classes de vulnerabilidade foram obtidas a partir da matriz da Tabela 3.15.

Tabela 3.15 Classes de vulnerabilidade física após reclassificação dos resultados obtidos

<div>Probabilidade de Inundação</div> <div>CVI</div>	1	2	3	4	5
1	V1	V1	V1	V2	V2
2	V1	V2	V2	V3	V3
3	V1	V2	V3	V3	V4
4	V2	V3	V3	V4	V5
5	V2	V3	V4	V5	V5

3.4.1 Cálculo do CVI

O índice proposto nesta dissertação tem em conta 7 parâmetros: distância à MPMAVE, geologia, geomorfologia, ocupação do solo, rácio da taxa de sedimentação e erosão, caudal fluvial e subsidência. Os parâmetros entendidos como relevantes para esta avaliação não são todos utilizados para as regiões de estudo, seja pela falta de dados disponíveis ou pela fraca influência dos mesmos na dinâmica do sistema. De seguida segue-se uma breve descrição da importância para a avaliação da vulnerabilidade física de um local dos parâmetros não incluídos, para estes casos, e a explicação para a sua exclusão.

A taxa de sedimentação/erosão é importante pois, uma tendência erosiva ou de deposição dos sistemas em estudo, influenciará a vulnerabilidade desse local à inundação e a dos locais adjacentes, principalmente em estuários, onde o transporte sedimentar é muito característico e variado ao longo de toda a área, originando locais de deposição e erosão de sedimentos com influência pontual. Não foram encontrados estudos rigorosos destas tendências para todos os locais das áreas de estudo, o que impossibilitou a inclusão desta no cálculo, assumindo-se que tanto a Ria como o Estuário na maior parte da sua área são sistemas com tendência de assoreamento (Silva, 2013; Marinheiro, 2008).

A geomorfologia nesta dissertação é entendida como as formas de relevo existentes no local, como por exemplo, arribas e planícies aluviais. Estas formas vão influenciar a vulnerabilidade do local pois estão directamente relacionadas com a elevação, com o declive e com a resiliência da forma. Quanto menor o declive maior irá ser o impacto da subida do nível médio do mar (Kumar *et al.*, 2010), o que torna as regiões em estudo de grande vulnerabilidade na sua generalidade. Esta informação não foi incluída nesta avaliação, embora seja importante considerá-la em avaliações futuras. A razão da exclusão desta variável deveu-se à falta de informação detalhada, e ao facto de o detalhe disponível influenciar de forma errada, na opinião da autora, o produto final.

Quanto à subsidência, não foram encontrados estudos que evidenciem a existência de movimentos verticais relevantes, nas duas áreas de estudo, não sendo incluído nos mapas finais. Contudo é de extrema importância contabilizar este factor em avaliações de mais pormenor ou em zonas em que existam evidências de subsidência, pois a mudança relativa do nível médio do mar em cada local resulta da combinação da componente eustática e outros movimentos verticais (isostasia) e, zonas costeiras em que se verificam taxas de subsidência que se sobrepõem às taxas de subida do NMM, vêm o seu risco de inundação aumentado.

O índice foi calculado, para o caso do Estuário do Tejo, a partir da seguinte formula:

$$CVI = Geologia * p1 + Caudal Fluvial * p2 + Ocupação do solo * p3 + Distância à MPMAVE * p4 \quad (3.7)$$

Em que p_i , com $i=1, \dots, 4$, são os pesos atribuídos a cada variável. Para o caso da Ria de Aveiro a forma de cálculo foi idêntica, mas para 3 parâmetros, a geologia, a ocupação do solo e a distância à MPMAVE.

O método utilizado para a agregação dos critérios foi o método WLC, descrito no *item* 2.4, e que consiste na combinação dos critérios através da sua ponderação. Foram experimentados dois métodos de atribuição de pesos, o método AHP e a licitação de especialistas.

3.4.1.1 Caracterização dos parâmetros físicos

I Geologia

A introdução da geologia nesta avaliação tem como finalidade caracterizar cada zona quanto à sua resiliência contra os possíveis impactos da subida do NMM, nomeadamente erosão.

As zonas de estudo são ambas muito homogéneas, compostas essencialmente por sedimentos recentes e finos (ex.: aluviões; areias de duna). A Ria de Aveiro é composta por aluviões actuais, areias de praia e areias de duna, apresentando, portanto, no geral, grande vulnerabilidade. No Estuário do Tejo pode fazer-se uma divisão entre as duas margens. A margem sul do Estuário do Tejo é essencialmente composta por aluviões, areias da Formação de Santa Maria e argilitos e conglomerados da formação de Marco Furado. A margem norte apresenta mais diversidade e uma geologia mais resistente à erosão quando comparada com a outra margem.

II Ocupação do Solo

A ocupação do solo é um factor que terá implicações na taxa de drenagem/infiltração da água. Nesta dissertação entende-se que solos mais impermeabilizados e com drenagem ineficiente deverão agravar o risco de inundação, o que será relevante principalmente em períodos de cheias provocadas pelo aumento do caudal do rio.

O Estuário do Tejo apresenta margens com forte assimetria, com a margem norte na sua maioria ocupado por terrenos artificializados e a margem sul com algumas zonas agrícolas e naturais. A Ria de Aveiro é cercada essencialmente por áreas agrícolas, vegetação arbustiva e terrenos artificializados.

III Caudal Fluvial

Um dos factores forçadores em ambientes como os Estuários é a água doce proveniente dos afluentes que desaguam nos Estuários, podendo influenciar a altura do nível de água verificado.

Segundo Vargas *et al.* (2008) verifica-se que, para os cenários em que apenas se faz variar o caudal do Tejo na fronteira montante, esta variação produz um aumento do nível de água pouco significativo no Estuário interno. Um elevado nível de água, devido a um pico de caudal de cheia, é atenuado assim que alcança o Estuário interno, devido ao elevado alargamento da secção do escoamento (Vargas *et al.*, 2008), logo a sobrelevação é desprezível na maioria do Estuário, só se fazendo sentir na zona mais estreita (Fortunato *et al.*, 2016). A montante, no troço entre Vila Franca de Xira e Muge, é onde as grandes descargas fluviais, causadas por cheias habitualmente, se fazem sentir, inundando as margens do canal (Freire, 1999), apesar das proteções existentes (Freire, 1999; Fortunato *et al.*, 2016).

Para o caso da Ria de Aveiro, este parâmetro não foi considerado. Marinheiro (2008), refere que, segundo outros autores, o caudal médio de água doce que aflui à Ria de Aveiro é cerca de 40 m³/s. Estes rios desempenham um papel importante na distribuição da salinidade, mas têm uma contribuição pouco significativa em termos do fluxo total (Marinheiro, 2008).

3.4.1.2 Métodos de ponderação dos parâmetros

A atribuição dos pesos às variáveis irá transformar os produtos finais, sendo por isso de extrema importância o nível de confiança com que estes são atribuídos. Os mapas de risco e vulnerabilidade são estudos geralmente sob grandes incertezas. A incerteza pode ser caracterizada em 3 dimensões: (1) localização, (2) nível e (3) natureza (Walker *et al.*, 2003 citado por Knol *et al.*, 2008). A incerteza é um ponto chave em avaliações de impacto ambiental, uma vez que, geralmente, tais avaliações são confrontadas com vários tipos de incerteza e porque estão sujeitos à sua acumulação.

Nesta dissertação optou-se por comparar duas metodologias de cálculo de pesos: Licitação de Especialistas e o método AHP.

O método de combinação dos critérios, para as duas metodologias, foi o WLC que baseia o seu cálculo na equação 3.9,

$$V(x_i) = \sum_j w_j r_{ij}, \quad (3.8)$$

em que w_j corresponde ao peso do critério e r_{ij} ao valor desse critério numa determinada célula, sendo que $\sum_j w_j = 1$.

I AHP

O primeiro passo na atribuição de pesos aos critérios, no método AHP, é a criação de uma matriz de comparação par a par (A). Os valores colocados na matriz são obtidos a partir de um julgamento individual, feito pela autora, com base na escala de Saaty (Tabela 3.16). Os cálculos intermédios serão apenas apresentados para o caso do Estuário do Tejo, para a Ria de Aveiro serão apresentados apenas os pesos resultantes desta metodologia.

Tabela 3.16 Escala fundamental de Saaty. (Extraída de Saaty, 1987)

Intensity of importance on an absolute scale	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate importance of one over another	Experience and judgment strongly favor one activity over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
7	Very strong importance	An activity is strongly favored and its dominance demonstrated in practice
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2,4,6,8	Intermediate values between the two adjacent judgments	When compromise is needed
Reciprocals	If activity <i>i</i> has one of the above numbers assigned to it when compared with activity <i>j</i> , then <i>j</i> has the reciprocal value when compared with <i>i</i>	
Rationals	Ratios arising from the scale	If consistency were to be forced by obtaining <i>n</i> numerical values to span the matrix

Tabela 3.17 Matriz de comparação par a par para o Estuário do Tejo, baseada na escala proposta por Saaty.
(Matriz A)

	Probabilidade de inundação	Geologia	Distância à MPMAVE	Ocupação do solo	Caudal fluvial
Probabilidade de inundação	1	8	8	7	2
Geologia	1/8	1	1/2	1/4	1/5
Distância à MPMAVE	1/8	2	1	1/3	1/4
Ocupação do Solo	1/7	4	3	1	1/4
Caudal Fluvial	1/2	5	4	4	1

O próximo passo é a determinação do vector de prioridades (w). Saaty parte do conceito de vectores característicos para determinar o conjunto do vector dos pesos (ou prioridades). Este processamento passa pelo cálculo sucessivo de matrizes de maior grau a partir da matriz A inicial

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (3.9)$$

Saaty (1987), propõe uma aproximação a este processo, em que a determinação do vector característico passa pela soma dos valores de cada coluna e normalização ao longo da coluna, de forma a obter a matriz A normalizada. De seguida, faz-se a média aritmética ao longo das linhas, determinando uma aproximação do vector de prioridades ou pesos. Contudo, Saaty (1987), alerta para o facto de esta aproximação poder resultar na inversão de prioridades. Adoptando esta metodologia simplificada a matriz A foi normalizada (Tabela 3.18) a partir da divisão de cada valor pelo total da coluna correspondente (valor próprio), e depois feita a média aritmética para cada linha.

Tabela 3.18 Matriz A normalizada

	Probabilidade de inundação	Geologia	Distância à MPMAVE	Ocupação do solo	Caudal fluvial	Média aritmética
Probabilidade de inundação	0.53	0.40	0.48	0.56	0.54	0.50
Geologia	0.07	0.05	0.03	0.02	0.05	0.04
Distância à MPMAVE	0.07	0.10	0.06	0.03	0.07	0.06
Ocupação do Solo	0.08	0.20	0.18	0.08	0.07	0.12
Caudal Fluvial	0.26	0.25	0.24	0.32	0.27	0.27

Ou seja, o vector de pesos, para o caso do Estuário do Tejo, será:

[Probabilidade; Geologia; Dist. MPMAVE; Ocupação do solo; Caudal Fluvial] =
[0.50;0.04;0.06;0.12;0.27]

A partir deste vector e da matriz A original é possível retirar uma aproximação do valor correspondente ao valor próprio principal, o maior valor próprio ($\lambda_{m\acute{a}x}$). Este cálculo faz-se com base na equação 3.11 retirada de Saaty, 1987. O valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$ resulta, portanto da multiplicação da soma de cada coluna (valor próprio) pelo vector w.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}w_j = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n a_{ij}) w_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{m\acute{a}x} w_i \quad (3.10)$$

O próximo problema é avaliar se estamos perante uma boa estimativa do vector dos pesos. Esta avaliação é feita a partir do cálculo dos índices CI (Índice de Consistência) e CR (Rácio de Consistência).

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n-1} \quad e \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.11)$$

A partir da tabela extraída de Saaty (1987) (Tabela 3.19), calculou-se um CR de 0.08, ou seja, 8%. Este valor encontra-se abaixo dos 10%, valor a partir do qual se aceitam os pesos atribuídos.

Tabela 3.19 Valores do Random Index (RI), extraídos de Saaty (1987)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Para a Ria de Aveiro obteve-se o vector de pesos seguinte e um CR de 0.09, ou seja 9%, também inferior a 10%:

[Probabilidade; Geologia; Dist. MPMAVE; Ocupação do solo] = [0.69; 0.05; 0.09; 0.18]

II Licitação de Especialistas

Com o intuito de aumentar a credibilidade dos mapas finais, e diminuir as incertezas, os pesos atribuídos a cada variável foram ainda solicitados a um grupo de 13 especialistas, constituído por docentes, alunos e ex-alunos da FCUL, todos eles envolvidos em matérias importantes para os temas em estudo nesta dissertação. O inquérito foi realizado via web, através de uma página criada para o efeito (<https://www.surveio.com/survey/d/X5E2M5G6V1R3K3F3Y?preview=1>).

O inquérito proposto teve como objectivo ser o mais simples e intuitivo possível, permitindo, contudo, retirar a informação necessária das respostas. É composto por 2 secções, cada uma com duas perguntas que seguem métodos de licitação diferentes. Cada secção diz respeito a uma das áreas estudadas. Os métodos escolhidos para este processo foram a ordenação através de preferências (*ranking*) e o *Point Allocation* (PA).

1

★

Ordene os critérios segundo a sua importância na avaliação da vulnerabilidade física do Estuário do Tejo:

☒	1. Ocupação do solo
☒	2. Perigosidade de inundação
☒	3. Geomorfologia
☒	4. Geologia
☒	5. Caudal Fluvial
☒	6. Distância à PMAVE

Figura 3.26 Ordenação dos critérios consoante as preferências dos especialistas (ranking order)

2

★

Atribua a cada critério uma pontuação relativa consoante a importância de cada um para esta avaliação:

Assignar 100 pontos

<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Ocupação do Solo</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> <div style="flex-grow: 1; border-bottom: 1px solid #ccc; position: relative;"> <div style="position: absolute; left: 0; bottom: 0; width: 10%; background-color: #333;"></div> </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-left: 5px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 90%; margin: 0 5px;"> 0 100 </div>	<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Perigosidade de inundação</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> <div style="flex-grow: 1; border-bottom: 1px solid #ccc; position: relative;"> <div style="position: absolute; left: 0; bottom: 0; width: 10%; background-color: #333;"></div> </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-left: 5px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 90%; margin: 0 5px;"> 0 100 </div>
<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Geomorfologia</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> <div style="flex-grow: 1; border-bottom: 1px solid #ccc; position: relative;"> <div style="position: absolute; left: 0; bottom: 0; width: 10%; background-color: #333;"></div> </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-left: 5px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 90%; margin: 0 5px;"> 0 100 </div>	<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Geologia</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> <div style="flex-grow: 1; border-bottom: 1px solid #ccc; position: relative;"> <div style="position: absolute; left: 0; bottom: 0; width: 10%; background-color: #333;"></div> </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-left: 5px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 90%; margin: 0 5px;"> 0 100 </div>
<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Caudal Fluvial</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> <div style="flex-grow: 1; border-bottom: 1px solid #ccc; position: relative;"> <div style="position: absolute; left: 0; bottom: 0; width: 10%; background-color: #333;"></div> </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-left: 5px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 90%; margin: 0 5px;"> 0 100 </div>	<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Distância à PMAVE</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> <div style="flex-grow: 1; border-bottom: 1px solid #ccc; position: relative;"> <div style="position: absolute; left: 0; bottom: 0; width: 10%; background-color: #333;"></div> </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin-left: 5px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 90%; margin: 0 5px;"> 0 100 </div>

Figura 3.27 Ordenação dos critérios consoante a preferência dos especialistas (Point Allocation)

O primeiro teve como finalidade servir como introdução ao problema, tornando mais fácil a alocação de pontos no procedimento seguinte. No método PA foi solicitado ao entrevistado que distribuisse um total de 100 pontos pelas variáveis a considerar. A única restrição imposta era que todos os pontos fossem alocados.

Os pesos obtidos, a partir do segundo método, para cada questionário, foram normalizados e obteve-se para cada critério a seguinte importância em percentagem (%), de acordo com a Tabela 3.20:

Tabela 3.20 Importâncias relativas obtidas para cada critério em percentagem (%), solicitado a 13 especialistas, a partir do método Point Allocation

	Estuário do Tejo	Ria de Aveiro
Caudal Fluvial	33.3	-
Geologia	16.5	23.1
Distância à MPMAVE	29.0	45.6
Ocupação do Solo	21.2	31.3

3.4.2 Resultados

A partir da adição das características físicas do terreno aos cenários de inundação, obteve-se a cartografia de vulnerabilidade, e com esta procurou-se destacar quais as regiões mais suscetíveis dado um determinado cenário, ou seja, quais as regiões que sofrerão mais a nível físico, sofrendo erosão ou danificação do terreno por dificuldade no escoamento, por exemplo.

As premissas aceites nesta avaliação foram: sedimentos mais finos serão mais facilmente erodidos que sedimentos mais grosseiros; rochas mais brandas serão erodidas mais rapidamente que rochas mais resistentes; solos mais impermeabilizados farão com que a inundação seja mais gravosa; a proximidade à coluna de água para um NMM projectado influenciará a vulnerabilidade de um local e que o caudal dos rios aumentará os danos da inundação.

Segundo as projecções avançadas, em 2050 o Estuário do Tejo terá um total de área classificada como extremamente vulnerável de 39.5% e, com a adição do *setup* do vento, prevê-se que esta área aumente para 43.9% (Tabela 3.21).

Como é possível ver nos mapas de vulnerabilidade produzidos esta área corresponde essencialmente a zonas de sapal, onde a proximidade à MPMAVE é mais elevada (Figura 3.28). A área total pertencente às classes 4 e 5 (muito vulnerável e extremamente vulnerável) é de 285 km² para o cenário B3a e de 320.5 km² para o cenário B4b.

Tabela 3.21 Classificação da vulnerabilidade do Estuário do Tejo para os cenários B3a e B4b em km² e percentagem pertencentes a cada classe de vulnerabilidade

	Vulnerabilidade B3a		Vulnerabilidade B4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	15.9	3.9	15.3	3.6
2	42.8	10.5	33.9	8.0
3	65.3	16.0	54.1	12.8
4	123.4	30.2	134.5	31.8
5	161.6	39.5	185.9	43.9
Total	409.1	100	423.7	100

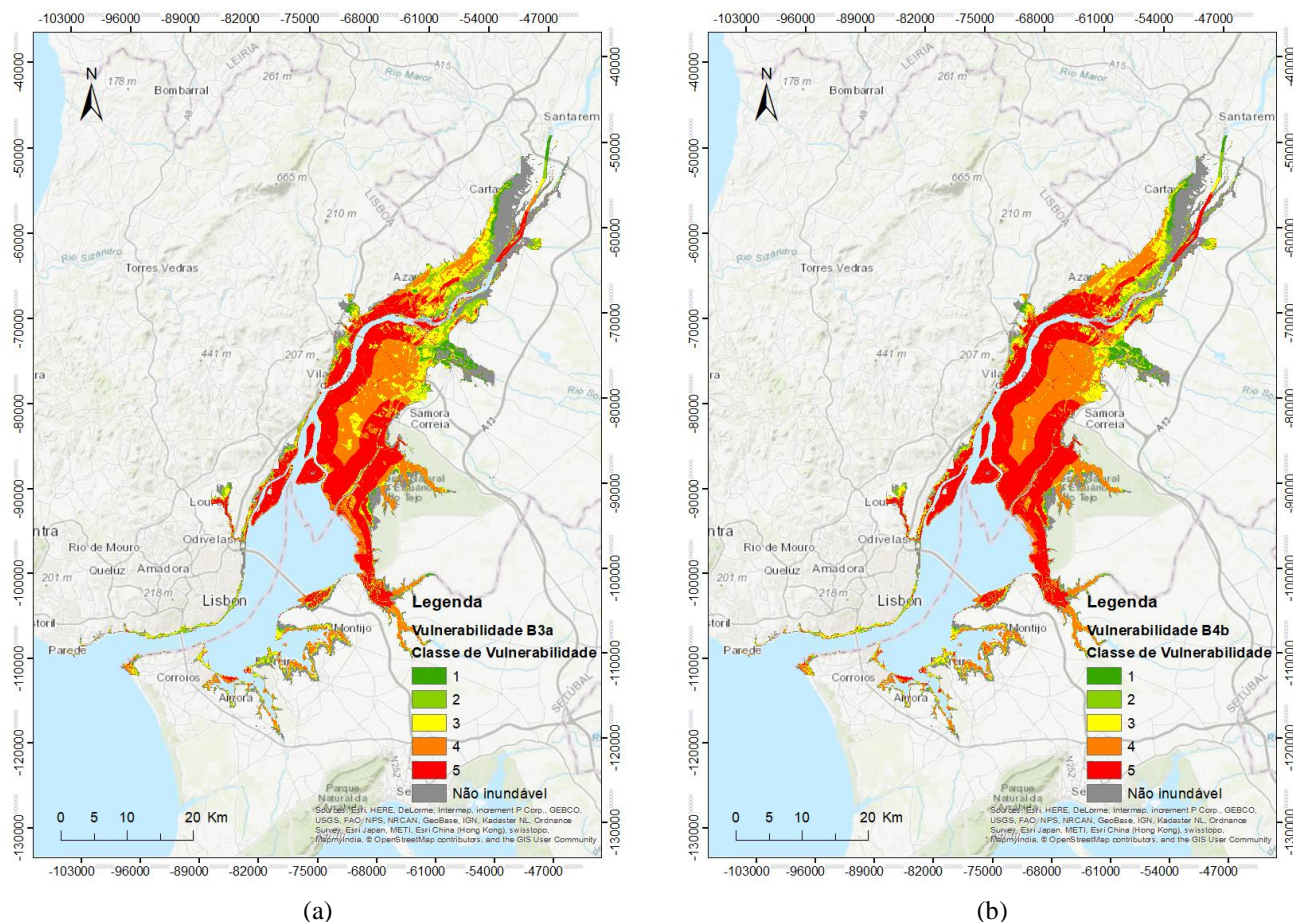


Figura 3.28 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para o Estuário do Tejo

Para o cenário de 2100, e avaliando o cenário menos gravoso, o Estuário do Tejo tem 44.1% da sua área classificada como extremamente vulnerável e 32.6% como muito vulnerável (classe 4). Estas percentagens sobem ligeiramente quando se passa para o cenário B4b, passando a existir um total de 80%, aproximadamente, de área classificada dentro das classes 4 e 5, e verifica-se um decréscimo das classes de menor probabilidade.

Tabela 3.22 Área inundada, em km², pertencente a cada classe de probabilidade para os dois cenários de inundação para 2100 para o Estuário do Tejo

	Vulnerabilidade C3a		Vulnerabilidade C4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	18.9	4.1	17.7	3.8
2	36.8	8.0	33.7	7.2
3	51.5	11.2	42.1	9.0
4	149.9	32.6	157.6	33.5
5	202.9	44.1	219.0	46.6
Total	459.9	100	470.2	100

É de notar as passagens abruptas da classe 5 para a classe 4 nos mapas de vulnerabilidade. Na região mais a montante, a forte influência da distância à MPMAVE na distribuição das classes de vulnerabilidade, cria uma faixa de vulnerabilidade superior nas zonas com distância à MPMAVE inferior a 2000 m.

A passagem abrupta de uma classe de vulnerabilidade para outra, marcada essencialmente por este critério e potenciada pelo Caudal Fluvial, não é natural. Se a avaliação for feita em conjunto com o mapa de inundação e, tendo em conta que estamos perante uma área de aluviões e aterros em termos geológicos e culturas temporárias (ex.: arrozais) em termos de ocupação do solo, percebe-se que talvez esta caracterização não esteja correcta, e esta divisão seja fictícia.

Esta influencia deixa de ser tão marcada a partir do ponto no mapa em que se considerou que o caudal fluvial não afectava o nível médio da água. Nesta região, que se estende desde Sacavém (margem Norte)–Pancas(margem Sul) até ao final do Estuário do Tejo, as classes predominantes são a 3 e a 4, de vulnerabilidade média e elevada vulnerabilidade, respectivamente (Figura 3.29).

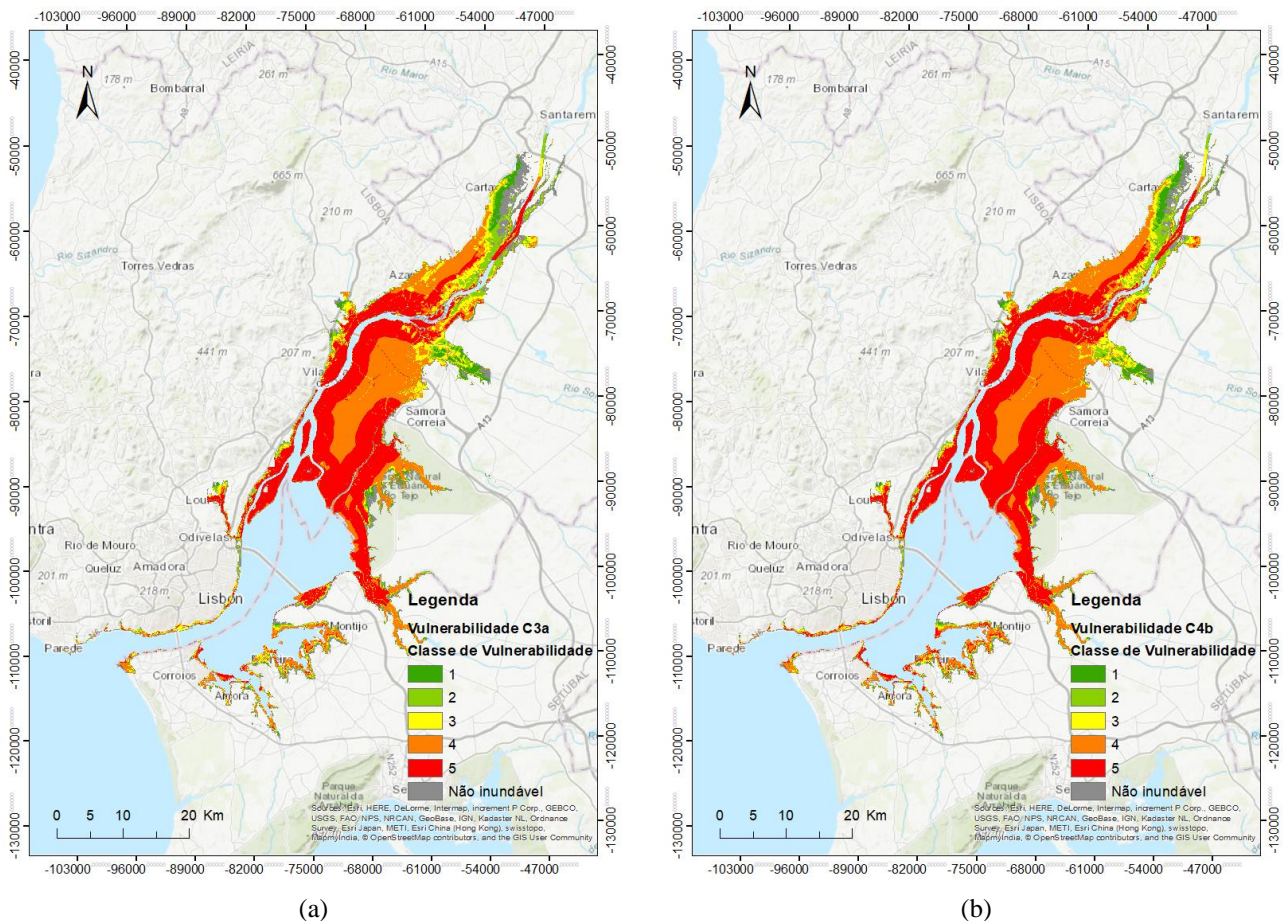


Figura 3.29 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para o Estuário do Tejo

A distribuição das áreas consoante a sua vulnerabilidade, como foi referido, é muito próxima à cartografia de inundação. Para o horizonte temporal de 2050, a Ria de Aveiro apresenta um total de 65.6% da sua área classificada como extremamente vulnerável (classe 5). Com a adição do *setup* do vento e ondas, esta percentagem sobe para 68.0%.

Tabela 3.23 Classificação da vulnerabilidade da Ria de Aveiro para os cenários B3a e B4b em km² e percentagem pertencentes a cada classe de vulnerabilidade

	Vulnerabilidade B3a		Vulnerabilidade B4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	7.0	3.5	5.4	2.5
2	23.3	11.6	18.5	8.8
3	17.3	8.6	19.1	9.0
4	21.9	10.8	24.7	11.7
5	132.6	65.6	143.7	68.0
Total	202.05	100	211.3	100

Nos mapas de vulnerabilidade produzidos para a Ria de Aveiro é também possível perceber a grande influência da cartografia de inundação, ainda mais evidenciada que no Estuário do Tejo, por se tratar de uma zona de características mais homogêneas e de baixas altitudes.

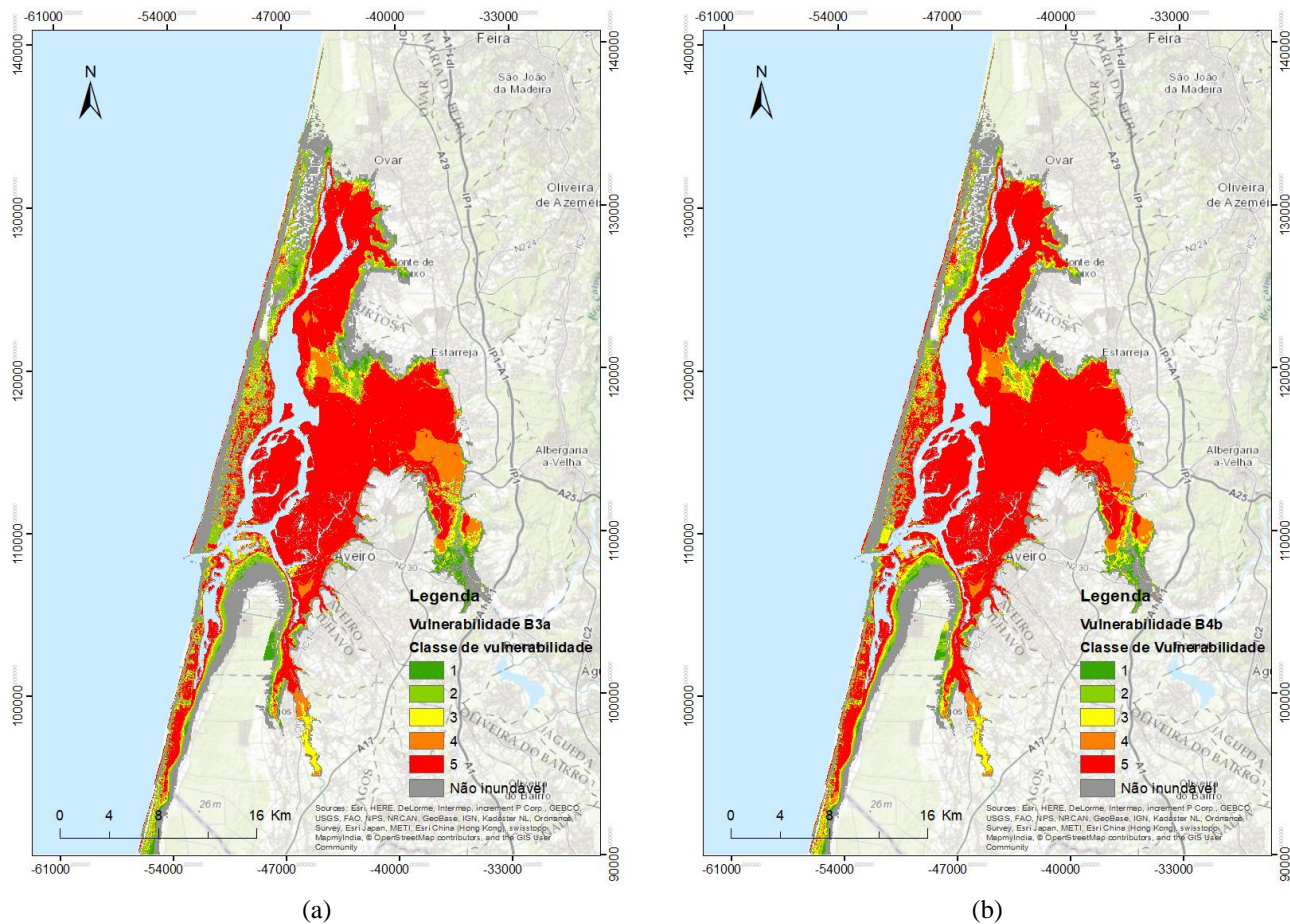


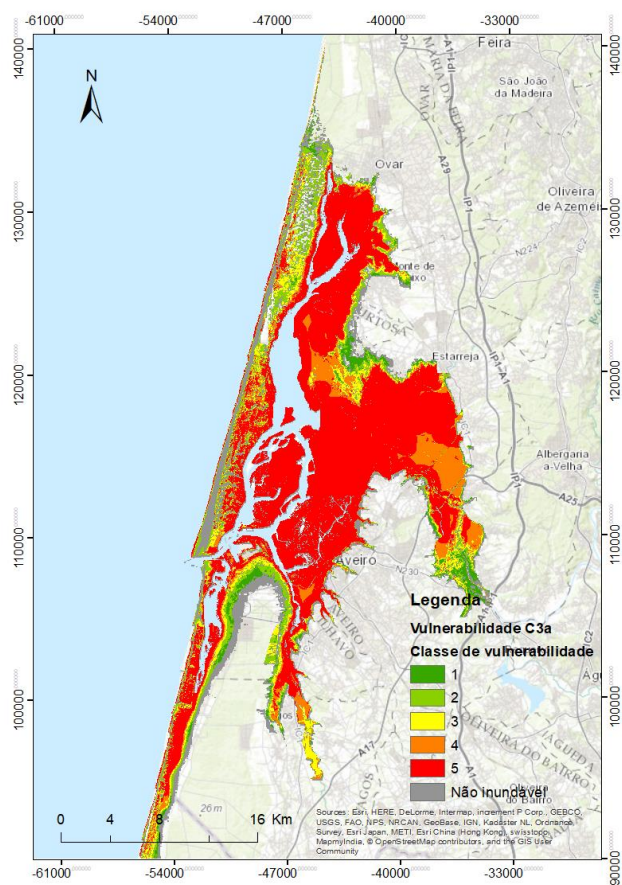
Figura 3.30 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para a Ria de Aveiro

A subida do NMM na Ria de Aveiro irá afectar importantes aglomerados industriais e habitacionais e ainda provocar a necessidade do aumento de intervenções, de dragagem por exemplo, no interior da Ria de forma a garantir a sua navegabilidade e a continuação da prática das actividades piscatórias e lúdicas que contribuem para o valor da região. Os impactos desta inundação são descritos em mais pormenor no capítulo do risco de inundação.

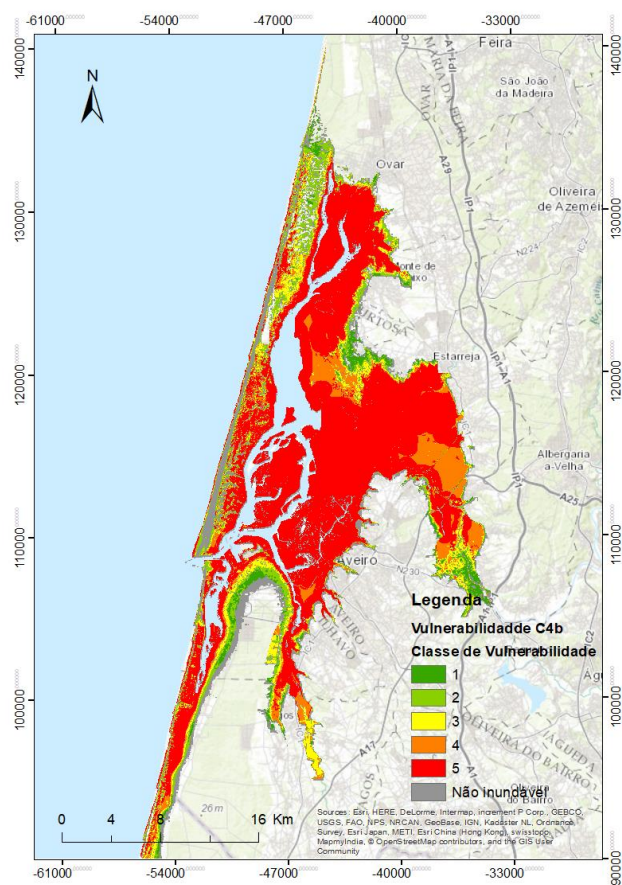
Para os cenários propostos para 2100 existe um aumento claro das áreas classificadas como extremamente vulneráveis, de 10 pontos percentuais, aproximadamente, relativamente ao cenário de 2050 (Tabela 3.24). Em ambos os cenários (2050 e 2100) é possível confirmar a fragilidade da Ria de Aveiro, pela extensão das zonas marcadas a vermelho e laranja, zonas estas constituídas essencialmente por sapais e zonas agrícolas (Figura 3.31).

Tabela 3.24 Classificação da vulnerabilidade da Ria de Aveiro, para os cenários C3a e C4b, em km² e percentagem pertencente a cada classe de vulnerabilidade

	Vulnerabilidade C3a		Vulnerabilidade C4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	9.4	4.7	9.4	4.5
2	23.5	11.7	21.5	10.2
3	20.9	10.4	20.5	9.7
4	21.7	10.8	22.9	10.9
5	153.0	76.0	160.7	76.4
Total	228.40	100	235.0	100



(a)



(b)

Figura 3.31 Distribuição das classes de Vulnerabilidade para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para a Ria de Aveiro

3.5 Cartografia de Risco

A cartografia de Risco é o culminar do processo metodológico descrito até agora. Esta avaliação adiciona à probabilidade de inundação e à vulnerabilidade física de uma região a sua susceptibilidade social e económica, resultando em mapas que preveem o risco associado e identificando as zonas que necessitam de maior adaptação ou intervenção para protecção.

A determinação das zonas potencialmente afectadas foi baseada na sobreposição de dados de previsões da subida do nível do mar para diferentes cenários, previamente explicados, os MDT obtidos para o ano de 2011 e 2008, e a vulnerabilidade física da região e feita para a escala de maior pormenor a nível estatístico, as BGRI.

Neste capítulo é proposta uma metodologia para avaliação do risco, com várias fases de cálculo. Adaptando a metodologia aplicada por Benassai *et al.* (2015) e Aucelli *et al.* (2015), o valor socioeconómico foi avaliado através do Índice de Valor Socioeconómico Costeiro, ou, como referido anteriormente e daqui em diante, *Coastal Socio-economic value Index* (CSI), que irá depender do uso e ocupação do solo e do total da população nas áreas susceptíveis. Este índice é combinado com o dano (D) provocado pela inundação. A combinação destes dois parâmetros resulta na Exposição da região (Ex):

$$Ex = D * CSI \quad (3.12)$$

Por fim, o Risco será dado pela seguinte equação:

$$R = V * Ex, \quad (3.13)$$

Ou seja, o Risco será o produto da vulnerabilidade à inundação de uma área com a sua exposição à inundação.

A atribuição das classes de Risco foi feita a partir de matrizes de risco, a partir das quais é possível a extração de cenários de risco, através da combinação de duas dimensões, Exposição (Ex) e Vulnerabilidade (V), neste caso. A utilização das matrizes de risco permite uma interpretação simples e perceptível através de cores, em que o vermelho representa o risco mais elevado e o verde o menos elevado (Tabela 3.25). As descrições adoptadas para os diferentes níveis de risco, seguem uma abordagem de aversão ao risco, ou seja, conservativa.

Tabela 3.25 Matriz de Risco com definição das classes de risco resultantes da combinação das dimensões Exposição (Ex) e Vulnerabilidade (V)

Vulnerabilidade Exposição	1	2	3	4	5
1	R1	R1	R1	R2	R2
2	R1	R2	R2	R3	R3
3	R1	R2	R3	R3	R4
4	R2	R3	R3	R4	R5
5	R2	R3	R4	R5	R5

Em que as classes de risco têm a seguinte designação:

- R1: Risco baixo;
- R2: Risco moderado;
- R3: Risco elevado;
- R4: Risco muito elevado;
- R5: Risco extremamente elevado.

3.5.1 Cálculo da Exposição

3.5.1.1 Índice CSI

O CSI é calculado com base na equação seguinte:

$$CSI = P + U + E \quad (3.14)$$

Em que P é a densidade populacional em habitantes/km², U é a percentagem de área urbanizada/industrializada e E a percentagem de área com valor ecológico.

Cada parâmetro foi normalizado em 5 classes de vulnerabilidade, construídas com base na divisão feita no projecto EUROSION de 2004, mas adaptada à realidade das duas regiões em estudo.

Existem áreas de valor ecológico que se sobrepõem a áreas urbanas/ industrializadas. Ambas foram consideradas e incluídas nas classes correspondentes de U e E, de forma a não perder nenhuma informação quanto à vulnerabilidade de um local.

I Densidade Populacional

A população e a sua segurança são a principal razão destes estudos e por isso não seria prudente não a incluir na avaliação de risco. O Estuário do Tejo tem, segundo o Censos de 2011, um total de 143429 habitantes, ou seja, pessoas residentes.

No total a Ria de Aveiro, segundo os Censos de 2011 alberga 66355 habitantes num total de 31 freguesias.

Além do número de habitantes em cada região existem pessoas que serão afectadas indirectamente, não contabilizadas neste estudo. Estas pessoas são afectadas pela perda dos seus postos de trabalho e formas de sustento.

II Área Urbanizada/ Industrializada

A área estudada do Estuário do Tejo é constituída essencialmente por espaços agrícolas, como é possível ver na Figura 3.32. Na região mais próxima da embocadura é onde estão concentradas as áreas urbanas e os aglomerados industriais. Embora em pequena área relativa, existem ao longo da área do Estuário estruturas importantes para os concelhos e para o país.

Na margem Norte do Estuário estão situados dos monumentos mais importantes da história de Portugal como o Mosteiro dos Jerónimos e a Torre de Belém, e na margem sul importantes estruturas de logística comercial e industrial.

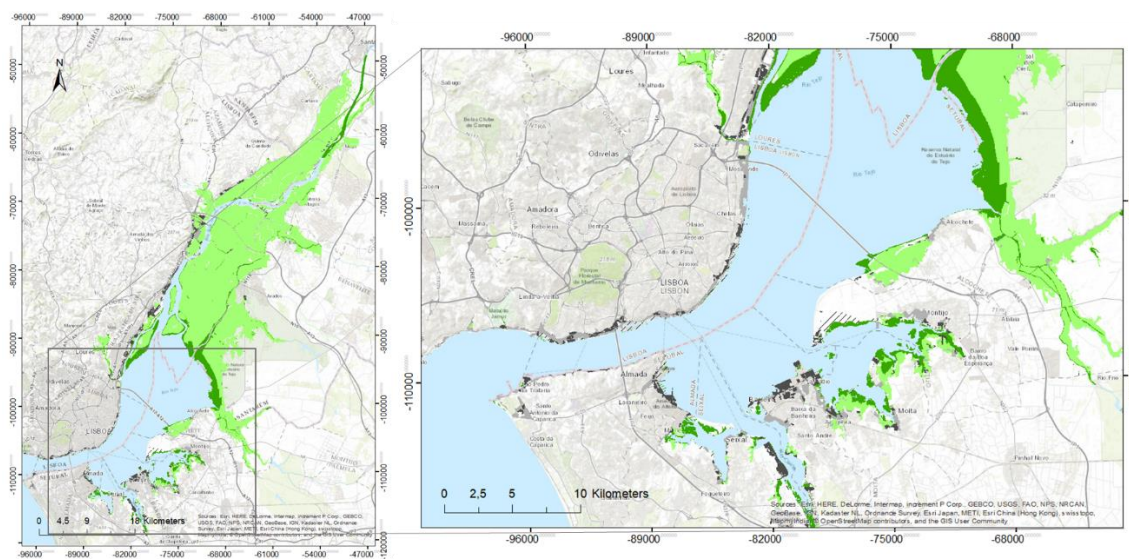


Figura 3.32 Distribuição das diferentes ocupações do solo ao longo do Estuário do Tejo.

A Ria de Aveiro tem como polos principais a aglomeração urbana do concelho de Ílhavo e Aveiro com a maior concentração de serviços, equipamentos, infraestruturas de mobilidade, infraestruturas logísticas portuárias, ferroviárias e concentrações de actividades industriais e logísticas e como polos secundários Estarreja, Murtosa e Ovar. Esta concentração é visível na Figura 3.33.

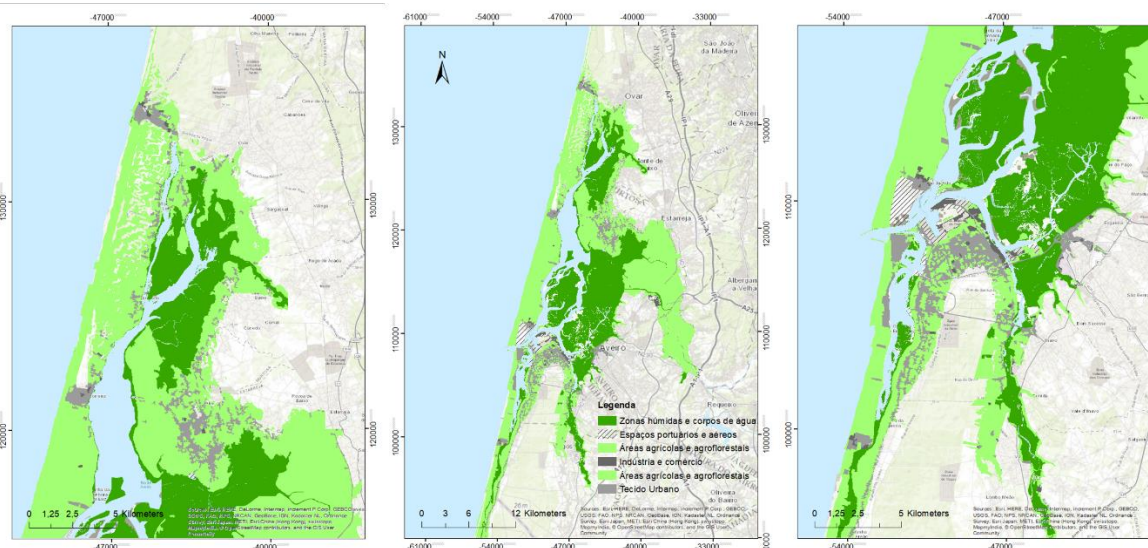


Figura 3.33 Distribuição das diferentes ocupações do solo ao longo da Ria de Aveiro

III Percentagem de Área Ecológica

As duas zonas de estudo são classificadas como importantes zonas protegidas. A Reserva Natural do Tejo abrange, segundo o ICNF, uma área de 14.416 ha, incluindo uma extensa superfície de águas estuarinas, campos de vasas recortados por esteiros, mouchões, sapais, salinas e terrenos aluvionares agrícolas (lezírias). A Reserva insere-se na zona mais a montante do Estuário distribuindo-se pelos concelhos de Alcochete, Benavente e Vila Franca e Xira. A área de valor ecológico presente em cada freguesia encontra-se na Tabela 3.26:

Tabela 3.26 Distribuição da área com valor ecológico pelas freguesias do Estuário do Tejo

Freguesia	Área de valor ecológico (%)
Alcochete	73.4
Samora Correia	90.8
Samouco	92.4
União das freguesias de Alhandra. São João dos Montes e Calhandriz	8.1
União das freguesias de Alverca do Ribatejo e Sobralinho	1.4
União das freguesias de Montijo e Afonsoeiro	4.7
União das freguesias de Póvoa de Santa Iria e Forte da Casa	3.4
União das freguesias de Santa Iria de Azoia. São João da Talha e Bobadela	1.6
Vila Franca de Xira	56.1

A Ria de Aveiro é composta, quase na totalidade, por zonas de importância ecológica, o ICNF destaca a existência de extensas zonas de sapal, salinas, áreas significativas de caniço e importantes áreas associadas a áreas agrícolas. Estas áreas apresentam-se como importantes locais de alimentação e reprodução para diversas espécies de aves, sendo que a área alberga regularmente mais de 20 mil aves aquáticas e um total de 173 espécies. Além da área designada por ZPE e SIC, que se sobrepõem quase na totalidade, a Ria de Aveiro inclui uma área protegida importante, as Dunas de São Jacinto.

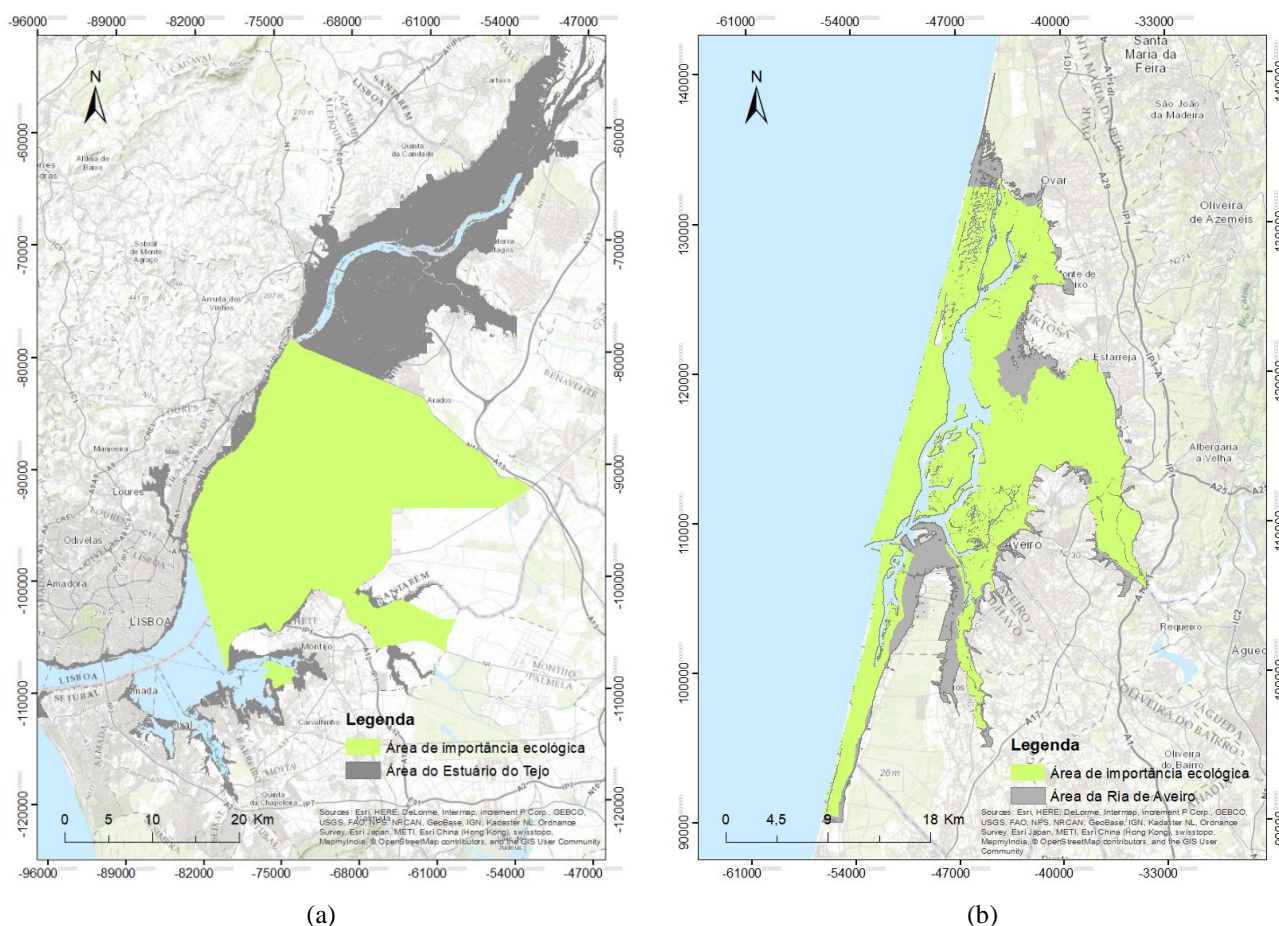


Figura 3.34 Localização das áreas de valor ecológico na região da (a) Estuário do Tejo e (b) Ria de Aveiro

3.5.1.2 Dano

O Dano refere-se ao potencial dano causado por uma inundação, em cada local. Esta metodologia procura contornar a construção de curvas de dano, atribuindo a cada local uma classe de destruição, perda ou desvalorização desde dano extremo (classe 5) a muito baixo dano (classe 1), incluindo em cada classe de dano os objectos descritos na Tabela 3.27. A informação para caracterizar o dano foi retirada da COS 2010, do nível de mais detalhe (5) até ao nível menos detalhado (1), disponibilizada pela DGT.

É importante ressaltar que durante o processamento foram identificadas zonas incluídas e duas classes de dano distintas, optou-se por atribuir ao local a classe de dano mais elevada, evitando assim a subestimação do potencial dano causado e consequentemente da classe de risco.

Tabela 3.27 Classes de Dano

1	2	3	4	5
Áreas naturais (não protegidas)	Casas dispersas, equipamentos turísticos e desportivos	Casas localizadas, zonas especiais de conservação e proteção	Herança nacional e edifícios de interesse público, áreas agrícolas	Aglomerado de casas habitadas com estradas e estruturas permanentes, vias de comunicação, zonas industriais e de comércio

3.5.2 Resultados

A metodologia descrita anteriormente permite a produção de cartografia de risco, classificando cada zona consoante a sua importância social e económica relativa (Figura 3.35).

Para o caso do Estuário do Tejo a generalidade da área inundável em 2050, 260 km², está classificada com risco elevado, nível 3. Analisando o mapa correspondente ao cenário B3a, menos gravoso, percebe-se que esta zona pertence à lezíria do Tejo, onde predomina a agricultura.

Os concelhos mais afectados segundo as projecções para este ano são Alcochete, Azambuja, Benavente e Vila Franca de Xira, com mais de 50% da sua área coberta por zonas de risco elevado e muito elevado, destaca-se destes concelhos o de Vila Franca de Xira que tem 90% da sua área classificada com nível 3 e 4, incluído a zona industrial.

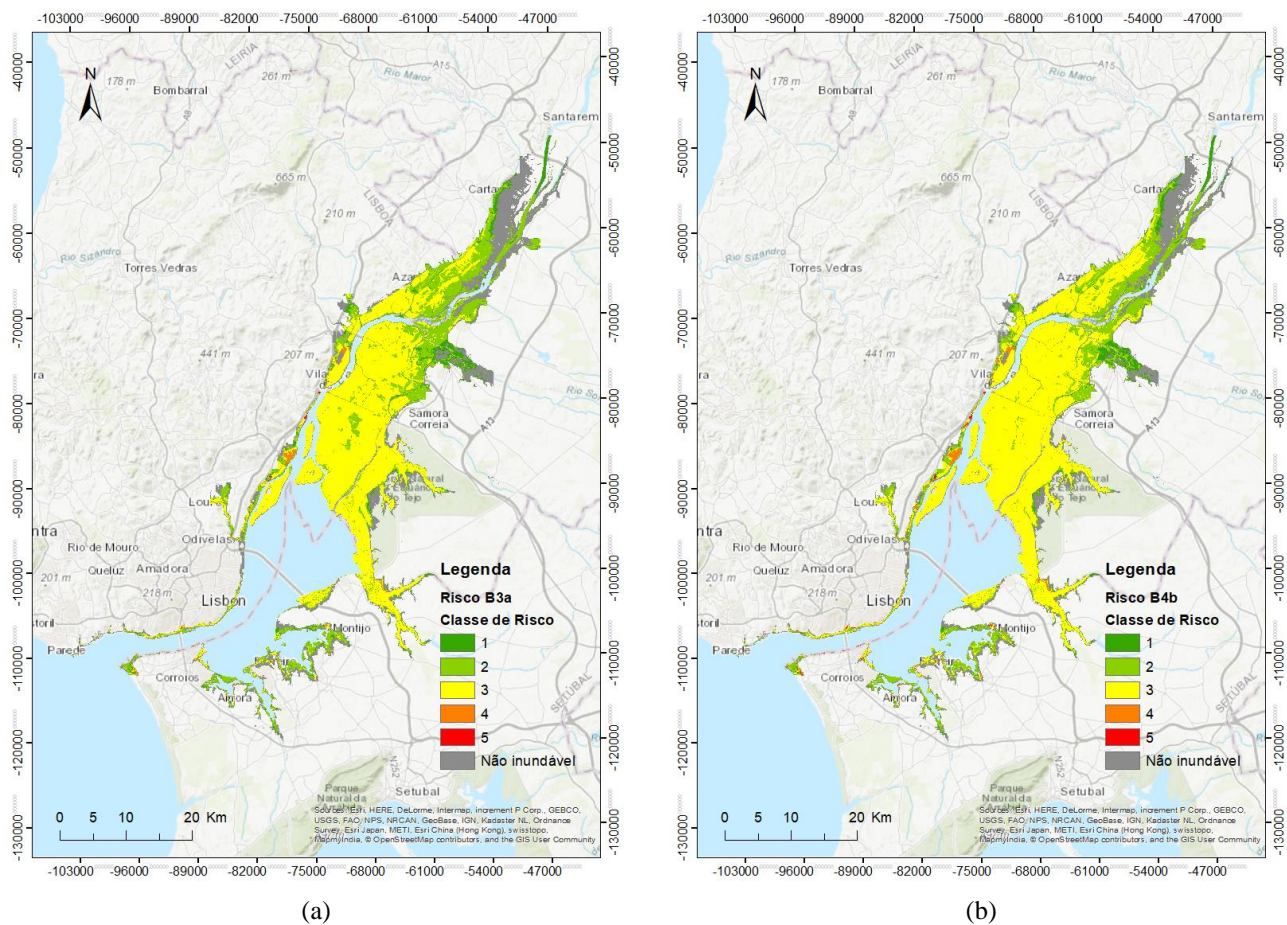


Figura 3.35 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para o Estuário do Tejo

Tabela 3.28 Classificação do risco do Estuário do Tejo, para os cenários B3a e B4b, em km² e percentagem pertencente a cada classe de risco

	Risco B3a		Risco B4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	27.6	6.8	26.0	6.2
2	112.9	27.9	96.6	23.1
3	260	64.3	290.1	69.2
4	3.7	0.9	5.5	1.3
5	0.4	0.1	0.8	0.2
Total	404.6	100	419	100

É de salientar ainda a existência de vários aglomerados habitacionais classificados com risco muito elevado e extremamente elevado, sem expressão quando se analisam áreas relativas. Como exemplo, temos uma área habitacional no Seixal, constituída por prédios, em que estão em risco cerca de 400 habitantes (Figura 3.36).

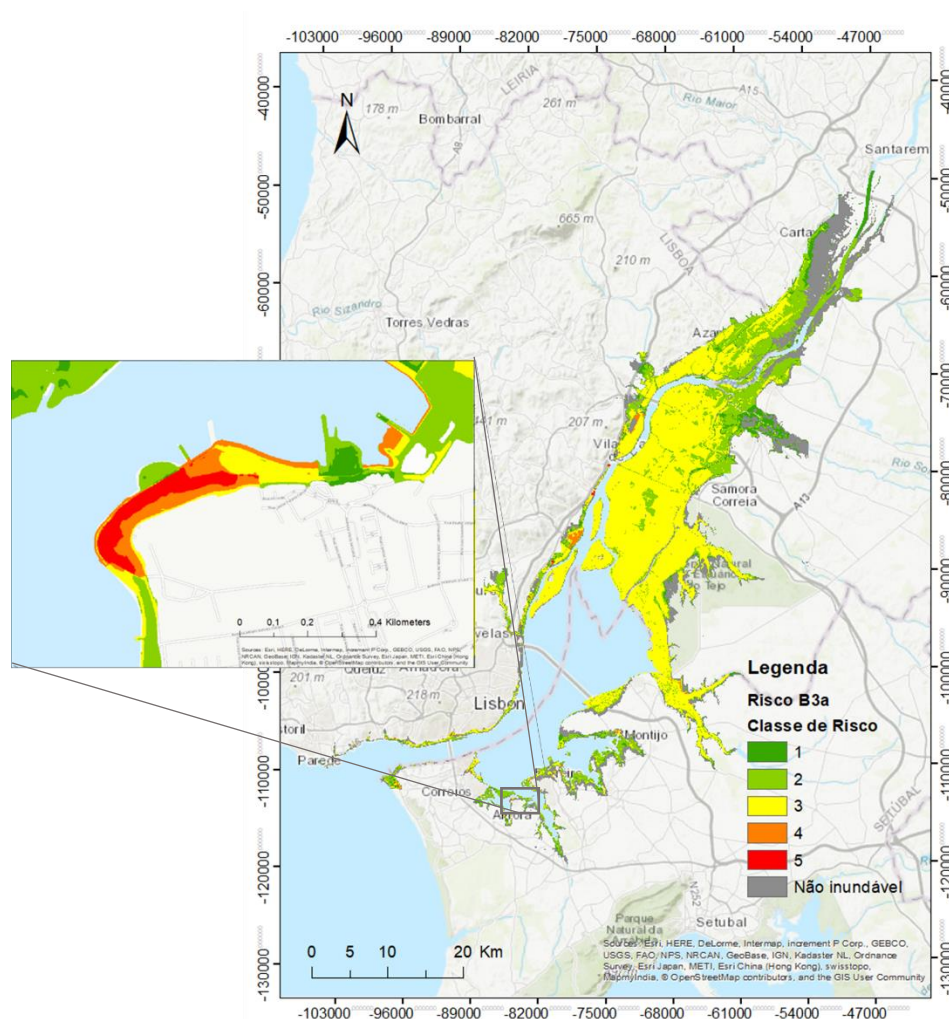


Figura 3.36 Evidência de uma zona de risco extremamente elevado, no Concelho do Seixal, em que são potencialmente afectados 400 habitantes para o cenário de 2050

Para o cenário de 2100 é visível o aumento das zonas classificadas com risco extremamente elevado, muito elevado e elevado. O Estuário do Tejo passa a ter 72 % da sua área classificada

entre estas 3 classes (Tabela 3.29). Para o cenário C4b, o mais gravoso dos 4 cenários em análise, esta área sobe para 75 %.

Tabela 3.29 Classificação do risco do Estuário do Tejo, para os cenários C3a e C4b, em km2 e percentagem pertencente a cada classe de risco

	Risco C3a		Risco C4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	30.06	6.61	27.92	6.01
2	99.37	21.87	91.69	19.74
3	315.54	69.43	332.07	71.50
4	7.94	1.75	10.40	2.24
5	1.55	0.34	2.36	0.51
Total	454.46	100	464.44	100

O aumento das zonas de risco mais elevado acontece em zonas já identificadas como muito importantes. São de destacar a Base Naval de Lisboa, o parque empresarial do Barreiro que alberga mais de 400 empresas, a base Aérea do Montijo, toda a zona ribeirinha do concelho e Lisboa, os polos industriais de Vila Franca de Xira e Loures e os seus aglomerados habitacionais junto ao Tejo, e o grande número de pessoas afectadas nas regiões do Barreiro, Seixal e Montijo (Figura 3.37).

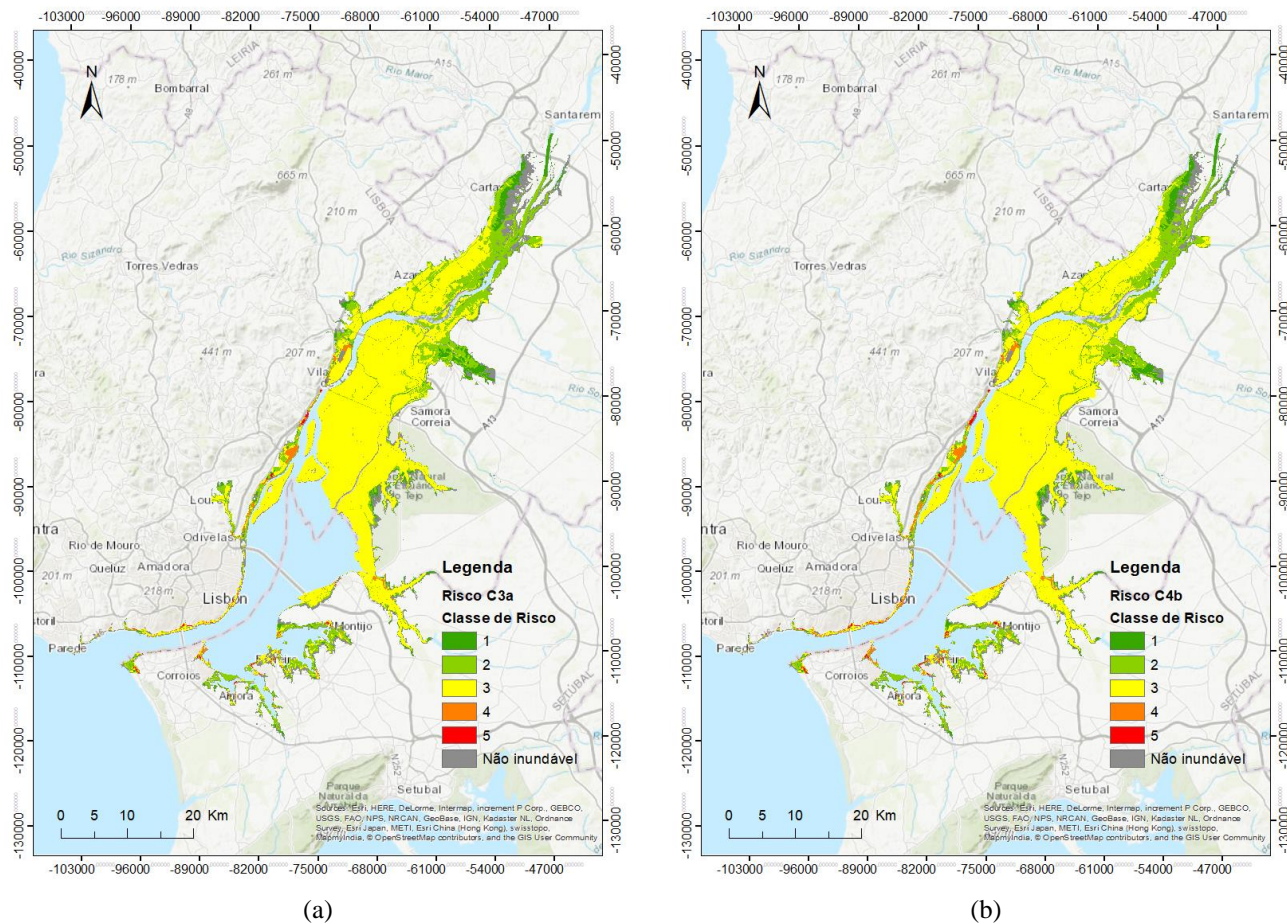


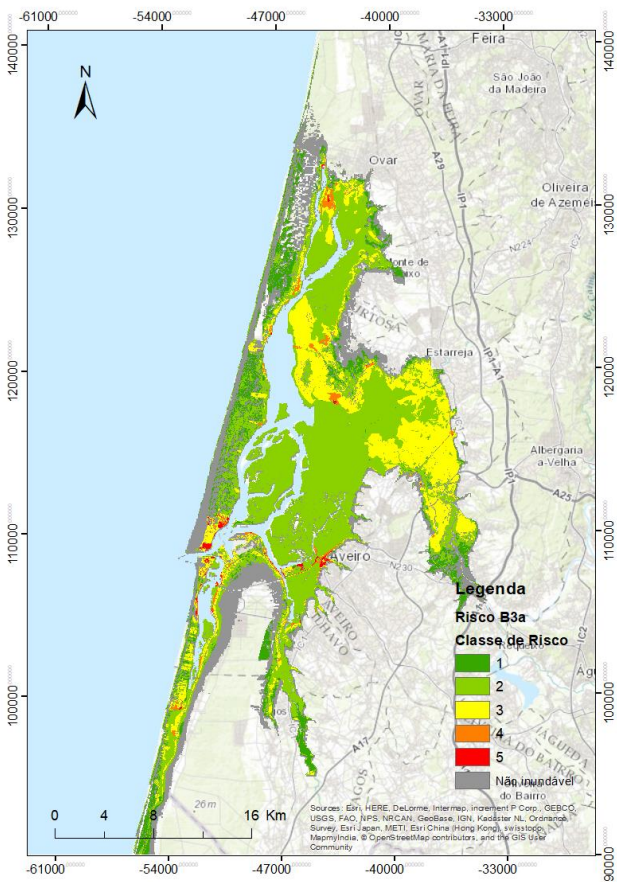
Figura 3.37 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para o Estuário do Tejo

No total, o número estimado de habitantes afectados directamente pela subida do nível médio do mar é de 17823, face a 13058 afectados já para o cenário de 2050. Este número aumentará se contabilizarmos o número total de pessoas afectadas indirectamente pela perda de postos de trabalho ou com outras formas de sustento como o é a agricultura.

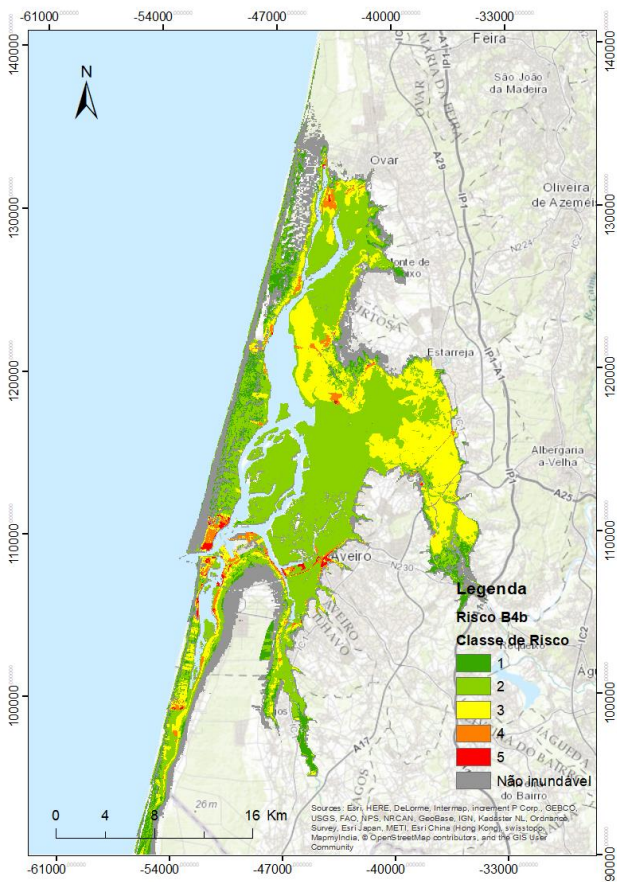
A Ria de Aveiro encontra-se quase na totalidade inserida na classe de risco 2, segundo as projecções para o ano de 2050, com um total de 61.2% de área inserida nesta classe.

Tabela 3.30 Classificação do risco da Ria de Aveiro, para os cenários B3a e B4b, em km² e percentagem pertencente a cada classe de risco

	Risco B3a		Risco B4b	
	Área (km²)	Percentagem (%)	Área (km²)	Percentagem (%)
1	25.3	12.6	21.7	10.3
2	123.0	61.2	127.0	60.4
3	47.9	23.81	53.6	25.5
4	3.8	1.	6.2	3.0
5	1.2	0.6	1.6	0.8
Total	201.2	100	210.2	100



(a)



(b)

Figura 3.38 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2050 e cenários (a) B3a e (b) B4b, para a Ria de Aveiro

Para as projecções feitas para 2100 verifica-se, à semelhança do que foi visto para o Estuário do Tejo, um aumento da área prevista com elevado e muito elevado risco, e um aumento também na área classificada na classe 5 de extremo risco. O cenário C4b apresenta um total de 34 % de área classificada entre as classes 3, 4 e 5 e a maioria da área da Ria de Aveiro continua classificada com risco de nível 2.

Na Ria de Aveiro verifica-se a afectação de estruturas relevantes, como a zona logística do Porto de Aveiro, redes viárias que constituem acessos importantes para a região, a Universidade de Aveiro, o complexo industrial de Cacia que alberga um elevado número de postos de trabalho, e aglomerados urbanos na região de Murtosa, Torreira, Ílhavo e Aveiro.

O número estimado de habitantes afectados para o cenário de 2100, segundo o proposto nesta dissertação, é de 12785, que representa um aumento significativo relativamente ao cenário de 2050, em que o número estimado de pessoas afectadas é de 8474.

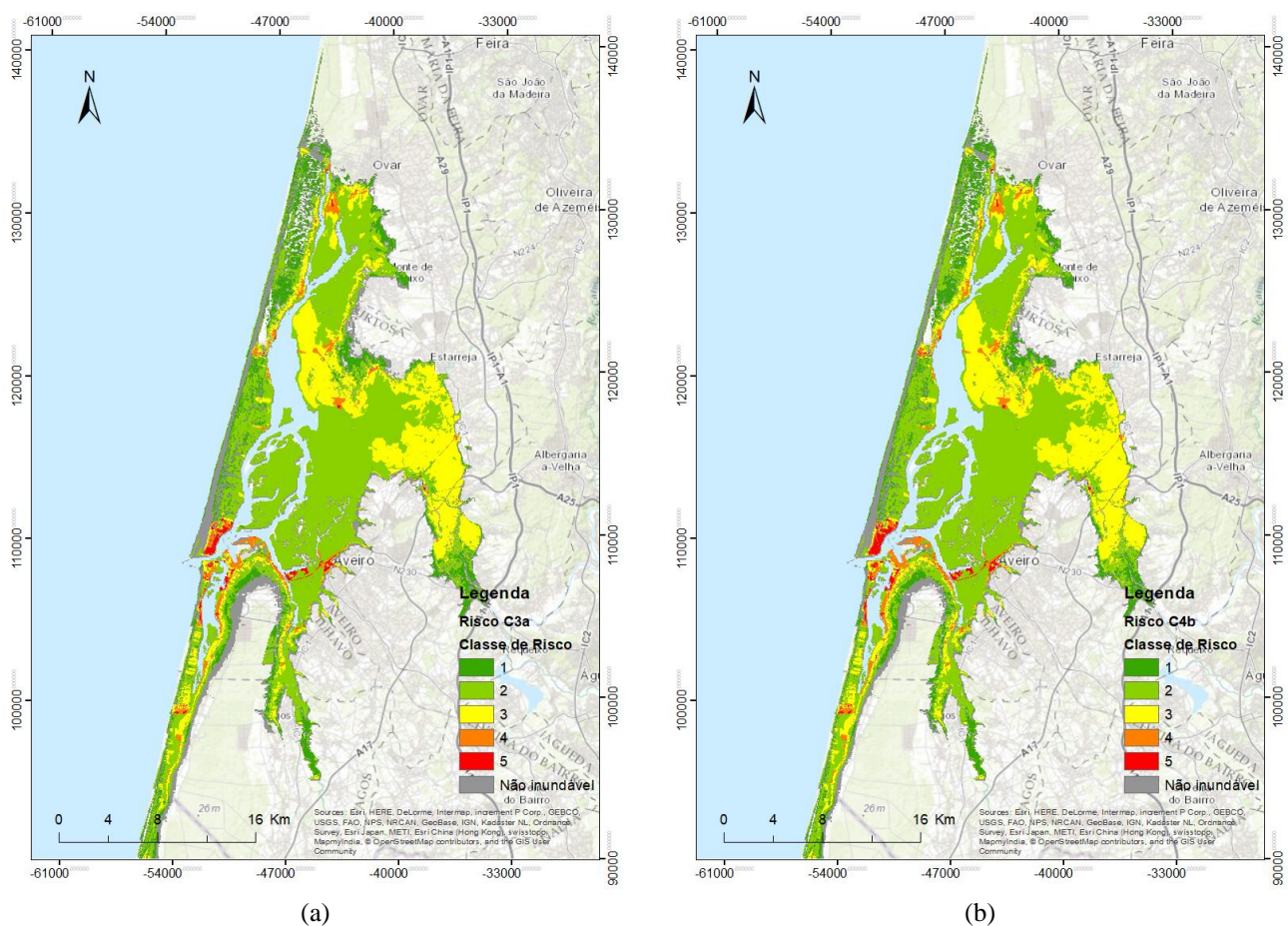


Figura 3.39 Distribuição das classes de Risco para o horizonte temporal de 2100 e cenários (a) C3a e (b) C4b, para a Ria de Aveiro

Um risco menos evidente nesta avaliação por se incluir no risco de nível 2, é a inundação da zona central da Ria. É ainda relevante alertar para a necessidade de avaliar a tendência de assoreamento previsto para a Ria de Aveiro, que acontecendo, aumentará a necessidade de mais trabalhos para manter a circulação na Ria será necessária, de forma a preservar o funcionamento dos vários centros piscatórios na Ria de Aveiro como Torreira, Ovar, São Jacinto, Murtosa e Pardilhó, e ainda o funcionamento das actividades lúdicas que conferem à Ria um valor turístico importante. Existem, portanto, inúmeros sectores económicos afectados de forma indirecta não contabilizados nesta contagem.

Tabela 3.31 Classificação do risco da Ria de Aveiro, para os cenários C3a e C4b, em km2 e percentagem pertencente a cada classe de risco

	Risco C3a		Risco C4b	
	Área (km ²)	Percentagem (%)	Área (km ²)	Percentagem (%)
1	29.7	14.8	28.6	13.6
2	132.5	65.9	135.6	64.5
3	56.3	28.0	59.1	28.1
4	7.2	3.6	8.3	4.0
5	2.2	1.1	2.8	1.3
Total	228.0	100	234.4	100

4 Conclusões

4.1 Conclusões

O problema sob investigação é actualmente cada vez mais estudado e desenvolvido a diferentes escalas e seguindo diferentes abordagens. O principal objetivo desta dissertação foi a concepção de um processo metodológico que culminasse na avaliação do risco das regiões da Ria de Aveiro e do Estuário do Tejo face à subida do nível médio do mar. Procurou-se que este processo fosse constituído por metodologias de fácil aplicação e implementação apoiadas em dados disponíveis gratuitamente e online na sua maioria, para a produção de cartografia de inundação, vulnerabilidade e risco. Os horizontes temporais em estudo são dois, o de 2050 e 2100, de médio e longo prazo e analisados quatro cenários no total, com base na subida do NMM e a inclusão de eventos extremos com diferentes períodos de retorno.

Após a conclusão dos trabalhos desenvolvidos é possível retirar conclusões relativas a diferentes aspectos. Relativamente à metodologia aplicada, conclui-se que esta dissertação apresenta um contributo relevante para uma primeira aproximação na avaliação das possíveis consequências de inundação provocada por alterações climáticas e um estudo subsequente dos trabalhos anteriores realizados por Rocha (2016) e pela equipa de investigadores da FCUL que se têm dedicado a este tema. Contudo, apresenta algumas limitações, relacionadas com a precisão e qualidade dos dados disponíveis e o rigor necessário para avaliar sistemas deste tipo, principalmente.

Relativamente à cartografia de inundação é de notar que a área total inundada, com maior probabilidade (classe 5), está sobrestimada, devido à zona inundável classificada incluir a actual área inundável pelo efeito de maré. Porém, entende-se que é importante incluir esta informação no mapa, pois põe-se a hipótese de que estas inundações possam causar alterações na salinidade dos solos e nas suas propriedades, o que poderá alterar as características do ecossistema.

Em ambos os locais de estudo é perceptível a grande influencia dos mapas de inundação, sendo principalmente este o parâmetro que mais influencia os mapas de vulnerabilidade finais. Nas figuras de maior pormenor, é possível ver esta evidência para o Estuário do Tejo e para a Ria de Aveiro.

Como referido em capítulos anteriores a cartografia de vulnerabilidade produzida, adicionando os cenários de inundação às características físicas do terreno, não acrescenta informação relevante à probabilidade de inundação. A razão apontada nesta dissertação como possível para tal acontecer é, essencialmente, a homogeneidade destes sistemas quanto à geologia e ocupação do solo. Sugere-se que deve ser feita uma avaliação mais pormenorizada com base em estudos de pequena escala, como é o exemplo do trabalho de Silva (2013), que indica, por exemplo, quais os sapais mais suscetíveis de serem alterados. Este tipo de análise melhoraria o detalhe desta avaliação, tornando-a mais precisa e completa.

O rendilhado presente nos mapas deve-se, essencialmente, à resolução espacial e a erros no MDT, provocado por erros de correcção e redução do MSD (Modelo Digital de Superfície). No caso do Estuário do Tejo soma-se a estes erros a supressão das cotas acima dos 6.5 m, para maior facilidade no processamento. Para obter um mapa contínuo e sem falhas, o MDT deveria ter sido corrigido destas falhas e incluídas todas as cotas na fase de processamento.

A cartografia de risco apresenta uma boa avaliação das zonas de maior risco presentes nas regiões de estudo e oferece uma forma de contabilizar potenciais danos que substitui a utilização de curvas de dano, de difícil elaboração, facilitando este processo.

Nesta avaliação foram utilizadas matrizes de Risco que permitem a extracção de cenários de risco, através da combinação das dimensões, Exposição e Vulnerabilidade. A utilização de matrizes de risco é amplamente utilizada em diversas áreas (Teixeira, 2015), devido à fácil aplicação e interpretação. No entanto, vários estudos indicam que o uso de matrizes de risco pode gerar inconsistências, entre as quais (Cox, 2008), interpretações subjectivas, atribuição de classificações idênticas a riscos muito diferentes e no final alocações de recursos sub-óptimas. É importante deixar este aviso, contudo seria necessária uma pesquisa mais aprofundada sobre este tema para entender qual a melhor técnica a utilizar.

Esta metodologia está aberta a melhorias, não aplicadas nesta dissertação devido ao curto tempo disponível:

- Possibilidade de atribuir pesos a cada critério utilizado na produção da cartografia final, nas várias fases de processamento, como a computação do índice de vulnerabilidade socioeconómico (CSI), por exemplo;
- Inclusão do valor patrimonial a cada porção de terreno, ficando assim com uma contabilização de perdas em termos monetários;
- Inclusão de variáveis socioeconómicas de forma a tentar perceber qual a resiliência da população, percebendo desta forma quais seriam os locais a necessitar de uma intervenção mais rápida, à semelhança do que foi feito no projecto CIRAC ou por Cutter *et al.* (2003), Boruff *et al.* (2005) ou Guillard-Gonçalves *et al.* (2015), por exemplo;
- inclusão de diferentes cenários que representariam a resposta de cada freguesia ao risco, ou seja, a inclusão de um critério no cálculo do CSI que variaria consoante as projecções de alteração da densidade populacional, crescimento, estagnação ou diminuição.
- O facto de a extensão das regiões em estudo cortar algumas BGRI, faz com que a informação dessa BGRI no mapa não seja totalmente real. A informação referente à densidade populacional deve ser recalculada para a área real pertencente à extensão das áreas em análise.

Existem algumas limitações ligadas a esta metodologia, dificilmente contornáveis nesta dissertação e num futuro próximo, como por exemplo, a utilização de dados referentes a diferentes anos, como a carta de ocupação do solo e a informação sobre a densidade populacional.

Apesar das limitações apontadas retiraram-se conclusões importantes a partir dos mapas produzidos, que apontam para regiões que merecem reordenação do seu território:

O Estuário do Tejo tem para o cenário de 2050 com o *setup* do vento e ondas um total de área inundável de 425.5 km², sendo que 62.3 % da sua área está classificada com uma probabilidade muito elevada de ser inundada (classe 5). Para o cenário mais gravoso existe uma probabilidade muito elevada de serem inundados cerca de 472.8 km².

Quanto à vulnerabilidade, as freguesias mais afectadas para o cenário de 2050 são Samora Correia, a União de Freguesias de Camarate, Unhos e Apelação, Corroios, Vila Franca de Xira e a União de Freguesias de Santo António dos Cavaleiros e Frielas, com mais de 75 % da sua área classificada como muito vulnerável. No cenário de 2100 estas freguesias veem agravada a sua vulnerabilidade e são afectadas 64 freguesias em toda a área do Estuário.

A Ria de Aveiro apresenta um total estimado de 145.5 km² de área com elevada probabilidade de inundação em situação extrema, que corresponde a 71.2 % da área com susceptibilidade de inundação

Para 2100 esta área aumenta e passa a existir cerca de 75% de zonas classificadas como muito provável de inundar. No cenário mais grave, C4b, o total de área com probabilidade de inundação superior a 60 % é de 88 % e as freguesias mais afectadas nesta região são as de Bunheiro, Ouça, Santo André e Vagos, Murtosa, Angeja, Cacia, Salreu e União das Freguesias de Glória e Vera Cruz.

Em relação à cartografia de risco, o Estuário do Tejo é preenchido, quase na totalidade, pela classe de risco 3, que corresponde a um risco elevado, constituindo 64.3 % da área total em 2050. Para este horizonte temporal já serão afectadas estruturas importantes, como a zona industrial de Vila Franca de Xira e Loures e aglomerados habitacionais com um elevado número de habitantes. Como exemplo, no Seixal, já em 2050 serão afectados cerca de 400 pessoas, com um risco extremamente elevado, caso se verifiquem as projecções avançadas. Em 2100 o risco agrava-se passando a afectar a Base Naval de Lisboa, a base Aérea do Montijo, toda a região ribeirinha do concelho de Lisboa, inclusive relevantes monumentos nacionais, os polos industriais do Barreiro, de Vila Franca de Xira e Loures, e ainda um grande número de conjuntos de habitações. Em suma, para o cenário de 2050 serão afectadas (para todas as classes de risco) cerca de 13058 pessoas. Este número é referente ao total de residentes afectados directamente pela inundação. Se se verificarem estas projecções e as perdas dos polos industriais referidos e com a possível perturbação de toda a lezíria do Tejo, teremos uma afectação de mais pessoas de forma indirecta, com a possível perda dos seus postos de trabalho ou forma de sustento.

A Ria de Aveiro tem para o cenário de 2050 um total estimado de 8474 pessoas afectadas, nos amontoados urbanos mais importantes da região, Murtosa, Torreira, Ílhavo e Aveiro. Em 2100 o número total de habitantes estimado sobe para 12785. As infraestruturas afectadas que importam destacar são a zona logística do Porto de Aveiro, vias de comunicação importantes para a região, a Universidade de Aveiro, o complexo industrial de Cacia e os aglomerados habitacionais já referidos.

A maioria da área pertencente à Ria está classificada com nível 2 de risco, 65.9%, porém avança-se a hipótese de esta área estar classificada com um risco inferior ao que merecia, não podendo ser desvalorizada. Além de se tratar de uma região abrangida por diversos estatutos de protecção ambiental, com património ambiental de relevância, como a reserva Natural das Dunas e São Jacinto, o aumento do nível da água ao longo da Ria terá a possível consequência de aumentar o assoreamento já existente. O aumento da deposição colocará em risco o funcionamento da actividade piscatória, importante actividade económica na região, e de actividades lúdicas potenciadoras do turismo.

Os principais desafios encontrados prendem-se com os dados recolhidos, nomeadamente, a dificuldade de encontrar dados de resolução espacial adequada e actualizados, resultando em mapas construídos com base em informação de anos não coincidentes. Um desafio relevante foi também a incapacidade de deter um entendimento aprofundado de todos os processos físicos e socio-económicos existentes no Estuário do Tejo e na Ria de Aveiro. Por se tratarem de sistemas complexos, com características que merecem uma abordagem local, nesta dissertação foi aplicada uma simplificação que pode resultar em avaliações sub ou sobre-estimadas em certos pontos.

Em suma, este trabalho fornece informação relevante para o problema, deixando-se a seguir a indicação de um conjunto de correcções e possíveis melhorias para uma mais adequada avaliação. Esta avaliação alerta ainda para o facto, já apontado por vários autores, da necessidade de estudos de ordenamento do território com tomadas de decisão com vista a uma boa adaptação como resposta às alterações climáticas, mais concretamente à subida o nível médio do mar e a inclusão do conhecimento proveniente de diferentes áreas das ciências sociais e do ambiente.

4.2 Recomendações futuras

Como referido anteriormente, as possibilidades disponíveis para o melhoramento dos resultados obtidos nesta dissertação são vastas e necessárias no enriquecimento dos produtos finais. No enquadramento actual, em que existe cada vez mais a consciência da necessidade deste tipo de estudos, só fará sentido dar continuação a este tipo de trabalhos acumulando cada vez mais conhecimento sobre a matéria.

As recomendações feitas na sequência desta dissertação são as seguintes:

- Introdução do valor patrimonial nos mapas de risco;
- Realização de uma licitação que inclua um maior número de especialistas e de entidades competentes, responsáveis pela tomada de decisões;
- Aprofundar a pesquisa sobre métodos para a interpretação do risco, de forma a contornar as incertezas associadas às matrizes de risco;
- Introduzir cenários de projecção de alterações demográficas, tentando prever qual a resposta da população ao risco;
- Introdução de estruturas de defesa existentes, artificiais ou naturais
- Melhorar os MDT através da correcção dos erros existentes;
- Ajuste dos dados à área interceptada pela região em estudo.

5 Bibliografia

Administração da Região Hidrográfica do Tejo (ARH Tejo) e Gabinete de Ordenamento do Território (2009). Plano de Ordenamento do Estuário. Saberes e Reflexões. Extraído de <https://www.apambiente.pt/zdata/Divulgacao/Publicacoes/Tagides/tagidespoe.pdf>.

Alfares, H. K., & Duffuaa, S. O. (2008). Criteria Rankings By a Group of Decision Makers, 7(4), 769–781.

Alves, T. M. G. (2013). Alterações climáticas: cenários socioeconómicos para a Ria de Aveiro (Master's thesis, Universidade de Aveiro).

Amorim, A. I. N. (2015). Detecção remota e geoprocessamento automático no estudo da evolução de margens estuarinas (Estuário do Tejo) (Dissertação de doutoramento, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa).

Andrade, C.; Freitas M.C. (2002) - Coastal Zones. In: F. D. Santos, K. Forbes e R. Moita (eds.), *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*, SIAM Project, pp. 173-219, Gradiva, Lisboa, Portugal.

Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal. FCUL Webpage, http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html, (consultada em Junho de 2017).

Antunes, C. (2011). Variação actual do NMM em Cascais. In VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia.

Antunes, C. (2012). Implicação da subida do NMM na necessidade de revisão dos sistemas de referência verticais, 1–6.

Antunes, C. (2014). Eventos extremos e a variação do nível do mar. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, (1), 33–36.

Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. In 4as Jornadas de Engenharia Geográfica, (1), 21–24.

Antunes, C. e J.M. Godinho (2011). Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais. Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, 5-6 de Maio, Porto, Portugal.

Antunes, C. e J.M. Godinho (2011). Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais. Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, 5-6 de Maio, Porto, Portugal. pp .

Antunes, C., e Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. *Journal of Coastal Research*, 218-222

APA, I.P e A. R. H. do Tejo (2013). Caracterização do regime de marés.

Aucelli, P. P. C., Di Paola, G., Incontrì, P., Rizzo, A., Vilaro, G., Benassai, G., ... e Pappone, G. (2016). Coastal inundation risk assessment due to subsidence and sea level rise in a Mediterranean alluvial plain (Vulturno coastal plain—southern Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Benassai, G., Di Paola, G., e Aucelli, P. P. C. (2015). Coastal risk assessment of a micro-tidal littoral plain in response to sea level rise. *Ocean and Coastal Management*, 104, 22–35.

- Benta, A. A. R. C. (2007). Aspectos do comportamento geomecânico da formação " argilas de Aveiro".
- Birkmann, J. (2007). Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, 7(1), 20–31.
- Boruff, B. J., Emrich, C., e Cutter, S. L. (2005). Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *Journal of Coastal Research*, 215(5), 932–942.
- Bottomley, P. A., Doyle, J. R., & Green, R. H. (2000). Testing the reliability of weight elicitation methods: direct rating versus point allocation. *Journal of Marketing Research*, 37(4), 508–513.
- Cardona, F. M. D. S. (2015). *Avaliação do risco de erosão, galgamento e inundação costeira em áreas artificiais de Portugal continental Estratégias de adaptação face a diferentes cenários de risco (relocalização, acomodação e proteção)* (Doctoral dissertation).
- CIRAC (2017). Project CIRAC – Flood Risk And Vulnerability Mapping in Climate Change Scenarios. Extraído de cciam.fc.ul.pt/prj/circac/
- CMCC (2017). Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici. Extraído de <http://www.cmcc.it/models/desyco>.
- Cooke, R. M., e Goossens, L. H. (2004). Expert judgement elicitation for risk assessments of critical infrastructures. *Journal of risk research*, 7(6), 643-656.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., e Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261.
- Danielson, M., e Ekenberg, L. (2017). A Robustness Study of State-of-the-Art Surrogate Weights for MCDM. *Group Decision and Negotiation*, 26(4), 677–691.
- Decreto-Lei nº 115/2010 de 22 de Outubro. Diário da República nº 206/2010 – I Série. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa
- Despacho nº 6574/2014 de 20 de Maio. Diário da República nº 96/2014 – II Série. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Lisboa
- Dias, J. A., e Taborda, R. (1988). Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto hidrográfico*, 9, 83-97.
- Dias, J. M. (2009). Hidro/morfologia da Ria de Aveiro: alterações de origem antropogénica e natural. *Debater a Europa*, 99–121.
- Dias, J. M. S. S. (2001). Contribution to the study of the Ria de Aveiro hydrodynamics.
- Dias, J. M., Lopes, J. F., e Dekeyser, I. (2003). A numerical system to study the transport properties in the Ria de Aveiro lagoon. *Ocean Dynamics*, 53(3), 220–231.
- Direcção Geral do Território (DGT) (2010). Carta de Ocupação do Solo. Extraído de http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/cartografia_de_uso_e_ocupacao_do_solo_cos_clc_e_copernicus/. Acedido em Outubro de 2016.
- Direcção Geral do Território (DGT) (2013). Cartografia e Ortofotocartografia à escala 1:2000. Normas técnicas de produção e reprodução. Extraído de http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/regulacao/

Direcção Geral do Território (DGT) (2015). Carta Administrativa Oficial de Portugal. Extraído de http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/caop_download/. Acedido em Setembro de 2016.

Directiva 2007/60/CE de 23 de Outubro. Jornal Oficial da União Europeia L288 – 6/11/2007. Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia.

Doody, P., Ferreira, M., Lombardo, S., Lucius, I., Misdorp, R., Niesing, H., ... & Smallegange, M. (2004). Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. Part III – Methodology for assessing regional indicators. Results from the EUROSION study. *European Commission: Luxembourg*.

Doukakis, E. (2005). Identifying Coastal Vulnerability Due to Climate Changes. *Journal of Marine Environmental Engineering*, 8(2).

Ervine, D. A., Bekic, D., e Glasson, L. (2007). Vulnerability of two estuaries to flooding and salinity intrusion. *Water Science and Technology: Water Supply*, 7(2), 125–136.

Fortunato, A. B., Freire, P., Bertin, X., Rodrigues, M., e Liberato, M. L. R. (2016). Inundação das margens do estuário do Tejo: o caso da tempestade de fevereiro de 1941, (1), 143–146.

Freire, P., Taborda, R., e Andrade, C. (2006). Caracterização das praias estuarinas do Tejo. In APRH, Congresso da Água (Vol. 8).

Füssel, H. M. (2007). Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17(2), 155–167.

Gornitz, V. (1991). Global Coastal Hazards From Future Sea-Level Rise. *Global and Planetary Change*, 89(4), 379–398.

Grupo de Trabalho do Litoral (GTL) (2014). Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança. Extraído de <http://www.apambiente.pt/ajaxpages/destaque.php?id=552.t>

Guillard-Gonçalves, C., Cutter, S. L., Emrich, C. T., e Zêzere, J. L. (2015). Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal. *Journal of Risk Research*, 18(5), 651–674.

Höhle, J., e Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398–406.

IH (2017). Instituto Hidrográfico. Marinha, Portugal. Extraído de <http://www.hidrografico.pt/glossario-cientifico-mares.php>.

Instituto da Conservação da Natureza e Florestas (ICNF) (2000). Plano Sectorial da Rede Natura 2000. Zonas de Protecção Especial. Extraído de <http://www.icnf.pt/portal/pn/biodiversidade/rn2000/resource/doc/zpe-cont/esttejo>

Instituto Nacional de Estatística (INE) (2011). Censos 2011 - Importação dos principais dados alfanuméricos e geográficos (BGRI). Extraído de <http://mapas.ine.pt/download/index2011.phtml>. Acedido em Fevereiro de 2017.

IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1–112.

- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(3), 251–273.
- Jiang, H., e Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173–184.
- Kaplan, S., e Garrick, B. J. (1981). On The Quantitative Definition of Risk, I(I).
- Knol, A. B., Slottje, P., Sluijs, J. P. Van Der, e Lebrecht, E. (2010). The use of expert elicitation in environmental health impact assessment : a seven step procedure, 1–16.
- Knol, A., Sluijs, J. P. Van Der, e Slottje, P. (2008). Expert Elicitation : Methodological suggestions for its use in environmental health impact assessments.
- Kumar, T. S., Mahendra, R. S., Nayak, S., Radhakrishnan, K., e Sahu, K. C. (2010). Coastal Vulnerability Assessment for Orissa State, East Coast of India. *Journal of Coastal Research*, 26(3), 523–534.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Carta Geológica à escala 1:50000. Extraído de http://geoportal.lneg.pt/geoportal/destaques/servicos_mapas.html. Acedido em Outubro de 2016
- Larsson, A., Riabacke, M., Danielson, M., e Ekenberg, L. (2015). Cardinal and Rank Ordering of Criteria — Addressing Prescription within Weight Elicitation. *International Journal of Information Technology e Decision Making*, 14(6), 1299–1330.
- Lemos, C. M. R. S. D. (2008). Base de dados geoambiental SIG para apoio à gestão do risco em Aveiro (Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro).
- Lillebø, A. I., Queiroga, H., Dias, J. M., Alves, F., & Cleary, D. F. R. (2011). Ria de Aveiro: Uma visão dos processos ambientais, ecológicos e socioeconómicos. *Actas das Jornadas da Ria de Aveiro, Universidade de Aveiro, CESAM-Centro de Estudos do Ambiente e do Mar*, 334-339.
- Lopes, C. L., Azevedo, A., e Dias, J. M. (2013). Flooding assessment under sea level rise scenarios: Ria de Aveiro case study. *Journal of Coastal Research*, 65, 766–771.
- Malczewski, J. (2000). On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5–22.
- Marcy, D., Brooks, W., Draganov, K., Hadley, B., Haynes, C., Herold, N., ... e Sutherland, M. (2011). New mapping tool and techniques for visualizing sea level rise and coastal flooding impacts. In *Solutions to Coastal Disasters 2011* (pp. 474-490).
- Marinheiro, J. M. S. (2008). *Assoreamento da Ria de Aveiro: causas e soluções* (Master's thesis, Universidade de Aveiro).
- McLaughlin, S., e Cooper, J. A. G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, 9(3), 233–248.
- Nicholls, R. J., Marinova, N., Lowe, J. A., Brown, S., Vellinga, P., de Gusmao, D., ... Tol, R. S. J. (2011). Sea-level rise and its possible impacts given a “beyond 4 C world” in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934), 161–181.
- Özyurt, G. (2007). Vulnerability of coastal areas to sea level rise: a case study on Göksu Delta. Ankara, Turkey: Middle East Technical University, Master's thesis, 99p.

- Özyurt, G., e Ergin, A. (2010). Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers. *Journal of Coastal Research*, 265-273.
- Prandle, D., e Lane, A. (2015). Sensitivity of estuaries to sea level rise: Vulnerability indices. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 160, 60–68.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810), 368-370.
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F. D., Gomes, A., Hilden, M., Laihonon, P., Marinova, N., Santini, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC CCA) Technical Paper, 1–93.
- Riabacke, M., Danielson, M., Larsson, A., e EKENBERG, L. (2012). Employing Cardinal Rank Ordering of Criteria in Multi-Criteria Decision Analysis. *Uncertainty Modeling in Knowledge Engineering and Decision Making*, 7, 76.
- Ribeiro, J. L. (2010). Riscos Costeiros – Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território. *Caderno Técnico PROCIV*, 1–156.
- Rilo, A., Fortunato, A., Freire, P., e Tavares, K. L. A. (2014). Suscetibilidade à inundação de margens estuarinas . Aplicação à baía do Seixal (estuário do Tejo , Portugal), (1), 24–27.
- Robinson, T. P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 50(2), 97-108.
- Rocha, C. S. (2016). Estudo e análise da vulnerabilidade costeira face a cenários de subida do nível do mar e eventos extremos devido ao efeito das alterações climáticas (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa).
- Rolim, J. (2014). Modelação hidrodinâmica da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica no estuário do Tejo. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira E Portuária, 1–19.
- Rosa, T. L., Barata, A., Cabaço, J. G., e Teles, M. (2012). Intervenções de Dragagem na Barra de Aveiro (Portugal) e de Protecção da Zona Costeira a Sul. *Revista Da Gestão Costeira Integrada*, 12(1), 57–75.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176.
- Shepard, C. C., Agostini, V. N., Gilmer, B., Allen, T., Stone, J., Brooks, W., & Beck, M. W. (2012). Assessing future risk: quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York. *Natural Hazards*, 60(2), 727-745.
- Silva, T. A. A. S. (2013). Sedimentologia e morfodinâmica de sapais do estuário do Tejo em cenários de alteração climática (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa).
- Taborda, R. & Dias, J.M.A (1992) - Análise da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981. *Geonovas nº 1 especial Geologia e o Ambiente*, p.89-97.

- Taborda, R., e Ribeiro, M. A. (2015). A simple model to estimate the impact of sea-level rise on platform beaches. *Geomorphology*, 234, 204–210.
- Torresan, S. (2011). Development of a Regional Risk Assessment methodology for climate change impact assessment and management in coastal zones.
- Vargas, C., Oliveira, F., Oliveira, A., e Charneca, N. (2008). Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo). *Revista Da Gestão Costeira Integrada*, 8(1), 25–43.
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., e McCall, R. (2017). Selecting coastal hotspots at the regional scale: the Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*, in review(January), 1–15.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., e Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278.
- Woodroffe, C. D. (2002). *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge University Press.